

Technologiebericht

5.1 Energieeffiziente Gebäude und Gebäudetechnik

innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende

Hans-Peter Ebert
Bastian Büttner
Ronny Kastner
Stephan Weismann
Helmut Weinländer
Jochen Manara
Constantin Römer
Andreas Baumann
Michaela Reim
Andreas Beck

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Disclaimer:

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03ET4036A-C durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts liegt bei den Autoren und Autorinnen.

Bitte den Bericht folgendermaßen zitieren:

Ebert, H.-P.; Büttner, B.; Kastner, R.; Weismann, S.; Weinläder, H.; Manara, J.; Römer, C.; Baumann, A.; Reim, M.; Beck, A. (2018): Technologiebericht 5.1 Energieeffiziente Gebäude und Gebäudetechnik. In: Wuppertal Institut, ISI, IZES (Hrsg.): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.

Hinweis:

Die multi-kriterielle Bewertung und generell die Erstellung dieses Berichts basiert auf den Vorgaben, die in Teilbericht 1 beschrieben sind:

Viebahn, P.; Kobiela, G.; Soukup, O.; Wietschel, M.; Hirzel, S.; Horst, J.; Hildebrand, J. (2017): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 1 (Kriterienraster zur Bewertung der Technologien innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende) an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal Institut, Fraunhofer ISI, IZES: Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.

Kontakt:

Dr. Hans-Peter Ebert

Tel.: +49 931 / 70564 – 334

Fax: +49 931 / 70564 – 600

E-Mail: hans-peter.ebert@zae-bayern.de

Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V.

Magdalene-Schoch-Straße 3

97074 Würzburg

Review durch:

Christoph Schmidt (Institut für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme gGmbH)

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Verzeichnis von Abkürzungen, Einheiten und Symbolen	5
Tabellenverzeichnis	7
Abbildungsverzeichnis	9
Zusammenfassung (Steckbrief)	10
1 Beschreibung des Technologiefeldes	12
2 Anwendungsbereich Gebäudehülle und Bautechnik	18
2.1 Beschreibung	18
2.2 Relevanz öffentlicher Förderung	24
2.2.1 Kriterium 1: Vorlaufzeiten	24
2.2.2 Kriterium 2: Forschungs- und Entwicklungsrisiken (technisch, wirtschaftlich, rohstoffseitig)	27
2.3 Detaillierte Bewertung des Anwendungsbereiches	38
2.3.1 Kriterium 3: Marktpotenziale	38
2.3.2 Kriterien 3-9 integrale Betrachtung	40
2.3.3 Kriterium 10: Unternehmerisch-technische Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit	40
2.3.4 Kriterium 11: Abhängigkeit von Infrastrukturen	41
2.3.5 Kriterium 12: Systemkompatibilität	41
3 Anwendungsbereich Gebäudesystemtechnik	42
3.1 Beschreibung	42
3.2 Relevanz öffentlicher Förderung	46
3.2.1 Kriterium 1: Vorlaufzeiten	46
3.2.2 Kriterium 2: Forschungs- und Entwicklungsrisiken (technisch, wirtschaftlich, rohstoffseitig)	47
3.3 Detaillierte Bewertung des Anwendungsbereiches	55
3.3.1 Kriterium 3: Marktpotenziale	55
3.3.2 Kriterien 3-9 integrale Betrachtung	56
3.3.3 Kriterium 10: Unternehmerisch-technische Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit	56
3.3.4 Kriterium 11: Abhängigkeit von Infrastrukturen	57
3.3.5 Kriterium 12: Systemkompatibilität	57
4 Anwendungsbereich Planung und Gebäudebetrieb	58
4.1 Beschreibung	58
4.2 Relevanz öffentlicher Förderung	60
4.2.1 Kriterium 1: Vorlaufzeiten	60
4.2.2 Kriterium 2: Forschungs- und Entwicklungsrisiken (technisch, wirtschaftlich, rohstoffseitig)	61
4.3 Detaillierte Bewertung des Anwendungsbereiches	66
4.3.1 Kriterium 3: Marktpotenziale	66

4.3.2	<i>Kriterien 3-9 integrale Betrachtung</i>	66
4.3.3	<i>Kriterium 10: Unternehmerisch-technische Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit</i>	66
4.3.4	<i>Kriterium 11: Abhängigkeit von Infrastrukturen</i>	66
4.3.5	<i>Kriterium 12: Systemkompatibilität</i>	67
5	Quartiere	68
6	Integrale Betrachtung der Kriterien 3 – 9	69
6.1	Kriterium 3: Marktpotenziale	69
6.2	Kriterium 4: Beitrag zu Klimazielen und weiteren Emissionsminderungszielen	73
6.3	Kriterium 5: Beitrag zur Energie- und Ressourceneffizienz	75
6.4	Kriterium 6: Kosteneffizienz	75
6.5	Kriterium 7: Inländische Wertschöpfung	76
6.6	Kriterium 8: Stand und Trends von F&E im internationalen Vergleich	78
6.7	Kriterium 9: Gesellschaftliche Akzeptanz	83
7	F&E-Empfehlungen für die öffentliche Hand	85
7.1	Übergreifende Aspekte	85
7.2	Gebäudehülle und Baustoffe	85
7.3	Gebäudesystemtechnik	86
7.4	Planung und Gebäudebetrieb	87
7.5	Quartiere	88
7.6	Zusammenfassung	89
	Literaturverzeichnis	91

Verzeichnis von Abkürzungen, Einheiten und Symbolen

Abkürzungen

BAS	Building Automation System
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt-, und Raumforschung
BDI	Bundesverband der deutschen Industrie
BIM	Modellierung auf der Basis von Gebäudedaten (engl. Building Information Management)
BIPV	Gebäudeintegrierte Photovoltaik (engl. Building integrated photovoltaik)
BIST	Gebäudeintegrierte Solarthermie (engl. Building Integrated Solar Thermal)
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau, Stadtentwicklung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
bzw.	Beziehungsweise
CAD-Software	Softwaregestützte Konstruktion (eng. Computer-aided-design)
CAGR	Continuous annual growth rate
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
d. h.	das heißt
DIW	Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DoE	Department of Energy (Office of Indian Energy Policy and Programs)
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EFH	Einfamilienhaus
EPO	Europäisches Patentamt
EU	Europäische Union
evtl.	eventuell
FuE	Forschung und Entwicklung
FI-HKL	Fassadenintegrierte HLK-Systeme
ggf.	gegebenenfalls
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen
GIPV	Gebäudeintegrierte Photovoltaik
g-Wert	Energiedurchlassungsgrad (Menge an Energie, die von Bauteilen durchgelassen wird)
HLK	Heizung, Lüftung, Klimatechnik
i. d. R.	in der Regel
IEA	International Energy Agency
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
IÖW	Institut für ökologische Wirtschaftsforschung
IR-Anteil	Infrarot-Anteil
KNX-Bus	Steuerungsnetz für die Gebäudeautomation
KS80 und KS95	Klimaschutzszenarien 80 und 95
LCA	Ökobilanz (engl. Life Cycle Assessment)
LED, OLED	Leuchtdiode, Organische Leuchtdiode
NZEB	Niedrigstenergiegebäude (engl. Nearly Zero Energy Buildings)
ÖKOBAUDAT	eine vom BBSR herausgegebene Baustoffdatenbank
p. a.	pro Jahr
PCM	Phasenwechselmaterial (engl. Phase-Change-Materials)
PTFE	Polytetrafluorethylen
PV	Photovoltaik
PVC	Polyvinylchlorid
PV-T	Photovoltaik-Solarthermie
PU-Schäume	Polyurethanschäume
SWS	Schaltbare Wärmedämmung
Tab.	Tabelle
TGA	Technische Gebäudeausrüstung

Einheiten und Symbole

%	Prozent
€	Euro
a	Jahr
°C	Grad Celsius
CO _{2-Äq.}	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente
EJ	Exajoule (Einheit für Energie)
FE	Fenstereinheit: 1 FE = 1,69 m ²
GW	Gigawatt (Einheit für Leistung)
kg	Kilogramm
kg/m ²	Kilogramm pro Quadratmeter
kW _{el}	Elektrische Leistung
kWh/(m ³ K)	Kilo-Watt-Stunde pro Kubikmeter und Kelvin
kWh/(m ² K)	Kilo-Watt-Stunde pro Quadratmeter im Jahr (Energiebedarf eines Gebäudes)
kWh/m ³	Kilo-Watt-Stunde pro Kubikmeter
l	Liter
m ²	Quadratmeter
m ³	Kubikmeter
Mio.	Millionen
mm	Millimeter
Mrd.	Milliarden

Tabellenverzeichnis


Tab. 1-1	Überblick über die untersuchten Technologien des Technologiefelds energieeffiziente Gebäude und Gebäudetechnik -----	17
Tab. 2-1	Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung von Technologien im Anwendungsbereich Gebäudehülle und Bautechnik -----	25
Tab. 2-2	Aktuelles Entwicklungsstadium des Anwendungsbereiches Gebäudehülle und Bautechnik -----	28
Tab. 2-3	Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit dem Anwendungsbereich Gebäudehülle und Bautechnik -----	36
Tab. 2-4	Indikatoren zur Bewertung der Pfadabhängigkeit und Reaktionszeit des Anwendungsbereiches Gebäudehülle und Bautechnik -----	41
Tab. 2-5	Abhängigkeit des Anwendungsbereiches Gebäudehülle und Bautechnik von Infrastrukturen -----	41
Tab. 3-1	Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung von Technologien im Anwendungsbereich Gebäudesystemtechnik -----	47
Tab. 3-2	Aktuelles Entwicklungsstadium des Anwendungsbereiches Gebäudesystemtechnik -----	48
Tab. 3-3	Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit dem Anwendungsbereich Gebäudesystemtechnik -----	54
Tab. 3-4	Indikatoren zur Bewertung der Pfadabhängigkeit und Reaktionszeit des Anwendungsbereiches Gebäudesystemtechnik -----	56
Tab. 3-5	Abhängigkeit des Anwendungsbereiches Gebäudesystemtechnik von Infrastrukturen -----	57
Tab. 4-1	Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung von Technologien im Anwendungsbereich Gebäudebetrieb und Planung -----	61
Tab. 4-2	Aktuelles Entwicklungsstadium des Anwendungsbereiches Planung und Gebäudebetrieb -----	63
Tab. 4-3	Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit Anwendungsbereich Planung und Gebäudebetrieb -----	65
Tab. 4-4	Einsparpotenzialabschätzung des Anwendungsbereiches Planung und Gebäudebetrieb -----	66
Tab. 4-5	Abhängigkeit des Anwendungsbereiches Planung und Gebäudebetrieb von Infrastrukturen -----	67
Tab. 6-1	Analyse des nationalen Marktpotenzials für das Technologiefeld Energie- und Ressourceneffiziente Gebäude -----	69
Tab. 6-2	Analyse des globalen Marktpotenzials für das Technologiefeld Energieeffiziente Gebäude und Gebäudetechnik -----	72
Tab. 6-3	Jährlich vermiedene Treibhausgas-Emissionen durch Anwendungsbereich Gebäudehülle in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall -----	74
Tab. 6-4	Jährlich vermiedener Primärenergieeinsatz durch Anwendungsbereich Gebäudehülle in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall -----	75
Tab. 6-5	Jährliche direkte und indirekte Kosteneinsparpotenziale (oder Mehrkosten) durch Anwendungsbereich Gebäudehülle in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall -----	76
Tab. 6-6	Bewertung des Standes von Forschung und Entwicklung für das Technologiefeld Energieeffiziente Gebäude und Gebäudetechnik – Input-Orientierung -----	79
Tab. 6-7	Internationale Aufstellung der deutschen Industrie hinsichtlich des Technologiefelds Energieeffiziente Gebäude und Gebäudetechnik -----	80
Tab. 6-8	Bewertung von Stand und Trends der Forschung und Entwicklung für das Technologiefeld Energieeffiziente Gebäude und Gebäudetechnik – Output-Orientierung -----	82

Tab. 6-9	Bewertungsraster für die Akzeptanz von das Technologiefeld Energieeffiziente Gebäude und Gebäudetechnik zum Status Quo (2015)-----	84
----------	--	----

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1	Endenergiebedarf in Deutschland für das Jahr 2014 aufgegliedert nach Verbrauchssektoren und Energieformen -----	12
Abb. 1-2	Zuordnung der Wohnfläche und des Heizenergiebedarfs in Deutschland nach Baualtersklassen-----	12
Abb. 1-3	Ca. 70 % des Wohngebäudebestandes ist für rund 80 % des Heizwärmebedarfs in Deutschland zuständig (Stand 2013)*-----	13
Abb. 1-4	Lebenszyklusphasen eines Gebäudes und identifizierte Innovationsfelder entsprechend der Expertenempfehlungen des Forschungsnetzwerkes Energie in Gebäuden und Quartieren-----	15
Abb. 2-1	Entwicklung des Energiestandards von Gebäuden untergliedert in verwendete, produzierte Energie und zusätzlich als Gesamtbilanz-----	18
Abb. 3-1	Prozentuale Aufteilung des Endenergiebedarfs für die Sektoren private Haushalte und Gewerbe, Handel, Dienstleistung im Jahr 2015-----	43
Abb. 6-1	Endenergiebedarf privater Haushalte für Raumwärme und Warmwasser, Ist-Werte und Prognosen -----	70
Abb. 6-2	In verschiedenen Studien ausgewiesene Sanierungsraten-----	71
Abb. 6-3	Endenergiebedarf nach Energieträgern für die Klimaschutzenszenarien KS80 und KS95 -----	71
Abb. 6-4	Entwicklung der verwendeten Endenergie im Technologiefeld Energieeffiziente Gebäude und Gebäudetechnik-----	73
Abb. 6-5	Durchschnittlicher Gesamtemissionsfaktor für die Szenarien KS80 und KS95 für den Zeitraum 2011 - 2050 -----	74
Abb. 6-6	THG-Emissionen privater Haushalte Deutschlands für die Szenarien KS80 und KS95 -----	75
Abb. 6-7	Scopus Recherche zu Publikationen mit dem Stichwort „Energy“ und „Building“ und prozentuale Zuordnung dieser Publikationen auf Länder-----	81
Abb. 6-8	Patentanalyse; Vergleich der Anmeldungen in Deutschland (DE), Europa (EP), Amerika (US), China (CN), Japan (JP) und der Welt (WO) zu dem Themenfeld energieeffiziente Gebäude -----	81
Abb. 6-9	Zuordnung der Patentanmeldungen am europäischen Patentamt zu Technologiegruppen -----	82
Abb. 7-1	Einschätzung des Förderbedarfs und des monetären Marktpotenzials-----	90
Abb. 7-2	Einschätzung des Förderbedarfs und des Marktpotenzials hinsichtlich CO ₂ -Einsparung -----	90

Zusammenfassung (Steckbrief)

Technologiefeld Nr. 5.1 Energieeffiziente Gebäude und Gebäudetechnik						
A) Beschreibung des Technologiefeldes und F&E-Bedarf						
Beschreibung des Technologiefeldes						
<ul style="list-style-type: none">– A: Gebäudehülle und Bautechnik mit den Technologien: Hochleistungswärmedämmung, funktionelle optische Oberflächen, transparente und transluzente Elemente, ressourcenschonendes Bauen und multifunktionale Fassadenelemente– B: Gebäudesystemtechnik mit den Technologien: Gebäudeautomation, Wärme- und Stromspeicher, HLK-Systeme (Low-Ex) und Kunstlicht– C: Planung und Gebäudebetrieb mit den Technologien: Informationsmanagement (BIM), Life Cycle Assessment, Monitoring und Diagnose und Nutzer-Gebäude-Beziehung und Schnittstellen						
Technologische Reife: A, B: Technologieentwicklung – Kommerziell (A=2-9), C: Technologieentwicklung – Kommerziell (TRL=4-9)						
Kritische Komponenten: Keine – ausreichend Redundanzen vorhanden						
Entwicklungsziele						
<ul style="list-style-type: none">– A: marktfähige Hochleistungswärmedämmungen, angepasste Wärmestrahlungseigenschaften von Oberflächen, Kostensenkung, Langzeitstabilität, Reduzierung Graue Energie, Vereinigung von Technologien in multifunktionalen Systemen– B: Weiterentwicklung hin zum Smart Grid (z. B. Netzdienlichkeit), Ermöglichung der Sektorkopplung, Erhöhung der Speicherkapazitäten, Effizienzsteigerung, Kostensenkung– C: Schnittstellenentwicklung, konsequente Berücksichtigung der Nachhaltigkeit, innovative Monitoringmethoden, Optimierung der Nutzer-Gebäudeinteraktion						
Technologie-Entwicklung						
	Einheit	2011-2015	2016-2020	2021-2030	2031-2040	2041-2050
Marktpotenziale Deutschland (Endenergieeinsparung)	TWh	48	204	886	671	396
Marktpotenziale International	TWh	1.080	2.250	12.650	10.450	12.200
Sanierungsrate in Deutschland	%/a	≈1	2,5	2,5	2,5	2,5
Durchschnittl. Heizenergiebedarf	kWh/(m²a)	110	101	82	63	44
Investitionsvolumen	Mrd. € ₂₀₁₅ /a	-	25	32	40	47
Marktpotenzial bezogen auf zusätzlichen Technologieeinsatz im Zeitraum, weitere Angaben bezogen auf Endjahre der Zeiträume						
F&E-Bedarf						
<ul style="list-style-type: none">– Entwicklung von Materialien, Komponenten und Systemen in den spezifischen Anwendungsfeldern– Evaluierung, Optimierung verbundener Technologien in realitätsnaher Umgebung (Living Lab)– Kombination komplexer Systeme, Synergieeffekte nutzen– Monitoring- und Regelkonzepte in Abstimmung mit Nutzer– Dezentrale Energiekonzepte in Verbindung mit Smart Grid						

B) Multikriterielle Bewertung	
Beitrag zu Klimazielen und weiteren Emissionsminderungszielen (gegenüber Referenz)	
<ul style="list-style-type: none"> – Klimaneutraler Gebäudebestand bis 2050 erreichbar durch Hand-in-Hand-Greifen von Technologieforschung, -entwicklung und -umsetzung. Ggü. Referenz Vermeidung von 121 Mio t CO₂-äq. in 2050. – Auf das Technologiefeld entfallen etwa 33 % der derzeitigen CO₂-Emissionen Deutschlands – davon können 80 - 95 % durch Technologieeinsatz vermieden werden. 	
Beitrag zur Energie- und Ressourceneffizienz (gegenüber Referenz)	
<ul style="list-style-type: none"> – 60 % des heutigen Endenergiebedarfs im Gebäudebereich können bis 2050 eingespart werden. – Der verbleibende Endenergiebedarf wird 2050 fast vollständig aus Erneuerbaren Energien gedeckt. – Gegenüber Referenz Primärenergieeinsparung von 1.730 PJ im Jahr 2050 möglich. – Verwendung von rezyklierbaren Rohstoffen und geschlossenen Materialkreisläufen. 	
Kosteneffizienz (gegenüber Referenz)	
<ul style="list-style-type: none"> – Durch hohes CO₂-Einsparpotenzial direkte Einsparung an Zertifikatskosten. – Ein marktfähiges Kosten-Leistungsverhältnis ist wesentlich für dieses Technologiefeld. 	
Inländische Wertschöpfung	
<ul style="list-style-type: none"> – Baurelevante Leistungen besitzen ein Volumen von etwa 440 Mrd. €/a (2008). – Jeder zehnte Sozialversicherungspflichtige arbeitet in der Wertschöpfungskette Bau. 	
Stand und Trends von F&E im internationalen Vergleich	
<ul style="list-style-type: none"> – Deutschland ist in den Anwendungsfeldern A bis C wettbewerbsfähig bzw. besitzt Technologieführerschaft. FuE-Budget 2014: Deutschland 32 Mio. € (USA 102, Finnland 37, Frankreich 33 Mio. €) – Gefahr die gute Stellung zu verlieren (Patentanmeldungen stagnieren), andere Länder (z. B. China, USA) weisen einen stärkeren Zuwachs und absolut höhere Anzahl an Anmeldungen auf. 	
Gesellschaftliche Akzeptanz	
<ul style="list-style-type: none"> – Je nach Technologiefeld heterogen, tendenziell hohe Akzeptanz. – FuE-begleitende Akzeptanzanalyse sinnvoll um kundenorientierte Produkte zu generieren. 	
Unternehmerisch-technische Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit	
<ul style="list-style-type: none"> – Entwicklungshemmnisse sind oftmals langwierige Prüfverfahren und lange Standzeiten von Bauprodukten (insbesondere Anwendungsfeld A, B etwas weniger ausgeprägt). – Anwendungsfeld B (z.B. HLK-Systeme) weist teilweise eine kritische Pfadabhängigkeit auf. 	
Abhängigkeit von Infrastrukturen	
<ul style="list-style-type: none"> – Keine Abhängigkeit bei Anwendungsfeld A und C (bei C leistungsfähiges IKT-System nötig). – Generell hohe Abhängigkeit bei Technologie B von intelligenten Versorgungsnetzen (Smart Grid). 	
Systemkompatibilität	
Das Technologiefeld ist generell als systemkompatibel einzustufen.	

1 Beschreibung des Technologiefeldes

1.1 Allgemeines

In Deutschland entfällt knapp 41 % des Endenergiebedarfs auf den Gebäudebereich (vgl. Abb. 1-1). Dieser Energieeinsatz ist mit einem Drittel aller anfallenden CO₂-Emissionen verbunden.

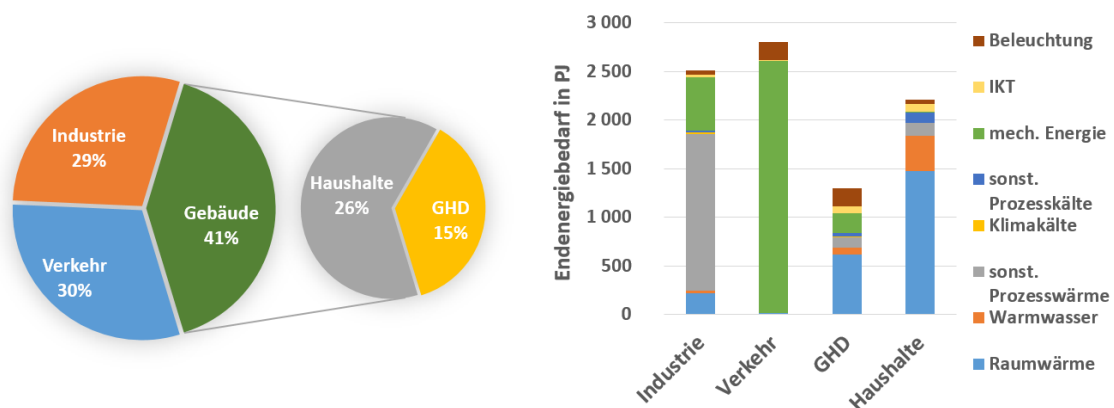


Abb. 1-1 Endenergiebedarf in Deutschland für das Jahr 2014 aufgegliedert nach Verbrauchssektoren und Energieformen

Bedenkt man, dass ca. drei Viertel des Endenergiebedarfs für den Gebäudebereich durch Wohngebäude verursacht werden, die vor 1979 – also vor der 1. Wärmeschutzverordnung errichtet wurden – wird deutlich, welchen Stellenwert die energetische Sanierung bei der Umsetzung der Energiewende einnehmen muss (siehe Abb. 1-2 und Abb. 1-3).

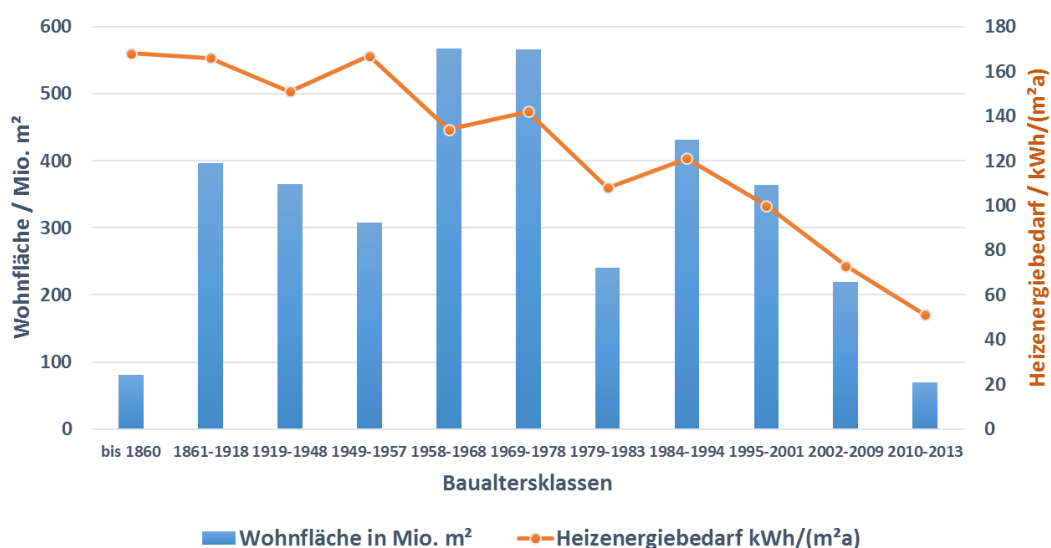
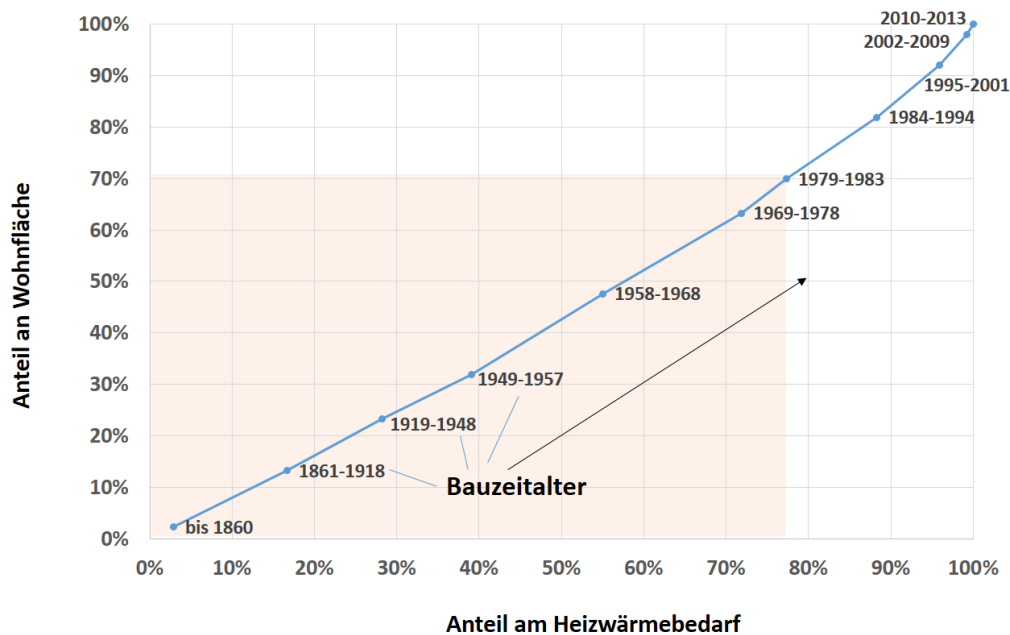


Abb. 1-2 Zuordnung der Wohnfläche und des Heizenergiebedarfs in Deutschland nach Baualtersklassen

Quelle: Statistisches Bundesamt (2013, 2015)



*Wohngebäude, die vor 1979, also vor der 1. Wärmeschutzverordnung errichtet wurden, zählen zu der Gruppe der Altbauten

Abb. 1-3 Ca. 70 % des Wohngebäudebestandes ist für rund 80 % des Heizwärmebedarfs in Deutschland zuständig (Stand 2013)*

Quelle: Statistisches Bundesamt (2013, 2015)

In ihrem Energiekonzept erklärt die Bundesregierung, dass im Gebäudebereich bis 2050 eine Minderung des Primärenergiebedarfs von 80 % angestrebt wird (BMWi 2010). Für die Umsetzung dieses Ziels ist die Nutzung der bestehenden Energieeffizienzpotenziale im Gebäudebereich wesentlich – hier werden Möglichkeiten zur Endenergieeinsparung von bis zu 54 % gesehen (BMWi 2015). Um dieses Potential zu erschließen und die Errichtung von nachhaltigen Gebäuden zu unterstützen, sind innovative Materialien, Komponenten und Systeme im Bereich der Gebäudehülle und der Gebäudetechniken und innovative Ansätze im Bereich der Planung sowie insbesondere die Kontrolle und Optimierung des Gesamtbetriebes notwendig. Ziel ist es, ein hohes Maß an Energieeffizienz und einen bestmöglichen Einsatz von erneuerbaren Energien für den Gebäudebestand zu erreichen, und dies unter der Maßgabe der Wirtschaftlichkeit, der Nachhaltigkeit, der optimalen Einbindung in ein intelligentes Stromnetz (Smart Grid) und eines hohen Nutzerkomforts. Übergeordnet bieten energieeffiziente Quartierlösungen die Chance, in hohem Maße Synergieeffekte zu nutzen.

Die Errichtung von Gebäuden und baulicher Infrastruktur sind mit hohen Investitionssummen und sehr langen Nutzungszeiträumen verbunden. Sanierungszyklen von 40 Jahren und mehr sind hier die Regel. In Deutschland verzeichnete die Baubranche im Jahr 2015 rund 100 Mrd. Euro Umsatz. Dabei verzeichnete die Branche einen Auftragseingang aus dem Ausland in Höhe von 24,7 Mrd. Euro (Statista 2016). In seinem Leitbild Bau (Bundesarchitektenkammer 2009) formuliert die deutsche Bauindustrie „Zur Erschließung und Gestaltung neuer Märkte müssen die Innovationspotenziale der Wertschöpfungskette Bau mobilisiert werden. Durch Kooperation

in der Forschung und Entwicklung aber auch in der Aus- und Weiterbildung kann die Diffusion neuer Baumaterialien, -verfahren und technischer Gebäudeausstattung beschleunigt werden.“

Die Bundesregierung sieht in der Effizienzsteigerung im Gebäudebereich ein zentrales Handlungsfeld. Sie stellt in ihrem 2010 veröffentlichten Energiekonzept fest: „Der Schlüssel zu mehr Energieeffizienz ist der Gebäudebereich“ (BMWi 2010). Entsprechend werden energieeffizienzbezogene Forschungs- und Entwicklungsvorhaben langfristig im Bereich Gebäude und Quartiere durch verschiedene Forschungsinitiativen unterstützt.

1.2 Besonderheiten der Bauwirtschaft

Bauen ist ein komplexer Vorgang. In welchem Umfang ein Gebäude energieeffizient ist, wird durch eine Vielzahl von Faktoren bestimmt. Neben gesetzlichen und städtebaulichen Rahmenbedingungen werden Gebäude wesentlich durch den Bauherrn definiert. Dieser möchte ein Gebäude zu einem bestimmten Zweck erstellen oder sanieren lassen, hat Vorstellungen über die Erscheinung und Nutzung des Gebäudes, die Qualität der Ausführung und über den Komfortstandard innerhalb eines ihm zur Verfügung stehenden Kostenrahmens. Architekten und Fachplaner setzen dann die Vorstellungen und Wünsche des Bauherrn in reale Pläne um und sind für die fachgerechte Ausführung des Bauvorhabens verantwortlich. Bauunternehmen und Handwerker aus zahlreichen unterschiedlichen Gewerken errichten das Gebäude. Dabei findet ständig ein Abstimmungsprozess zwischen Bauherrn, Planern und ausführenden Unternehmen statt, um die Ausführung zu konkretisieren und um gegebenenfalls auf sich verändernde Rahmenbedingungen zu reagieren (Kosten, Zeitpläne, Änderungswünsche des Bauherrn, Wetter usw.) (Arnold 2005).

Die Bauunternehmen und Handwerker bedienen sich bei der Realisierung industrieller Produkte (Baustoffe, Komponenten, Systeme) in unterschiedlichen Vorfertigungsgraden um ihre Gewerke zu erstellen. Die Qualität der industriellen Produkte wird in der Regel durch qualitätssichernde Maßnahmen überwacht. Damit kommt der Planungsphase, der richtigen Auswahl und Kombination der Produkte, der sachgerechten Verwendung der Produkte und Ausführung der Gewerke sowie der integralen Betriebskontrolle besondere Bedeutung zu. In diesem Zusammenhang ist es wichtig die Planungs- und Ausführungsgüte durch Fortbildung der (Fach-)Planer und Handwerker zu stärken.

Auch das Leistungsspektrum, welches an Gebäude im städtebaulichen Kontext heute und in der Zukunft gestellt wird, hat sich mit der Zeit verändert und neue Aspekte hinzugewonnen. Gebäude sollen zukünftig verstärkt aktive Elemente unserer Energieversorgungsinfrastruktur werden. Das Gebäude wandelt sich vom Status eines reinen Energienutzers hin zum dezentralen Energiebereitsteller und Energiespeicher. Damit ergeben sich für das Gebäude als auch das übergeordnete Quartier, deren Bestandteil solche Gebäude sind, neue Ansätze für innovative Energiekonzepte.

Innovationen bezogen auf die Realisierung energieeffizienter Gebäude können in verschiedenen Lebenszyklusphasen von Gebäuden und Stellen der Wertschöpfungskette im Bauwesen entstehen (vgl. Abb. 1-4).

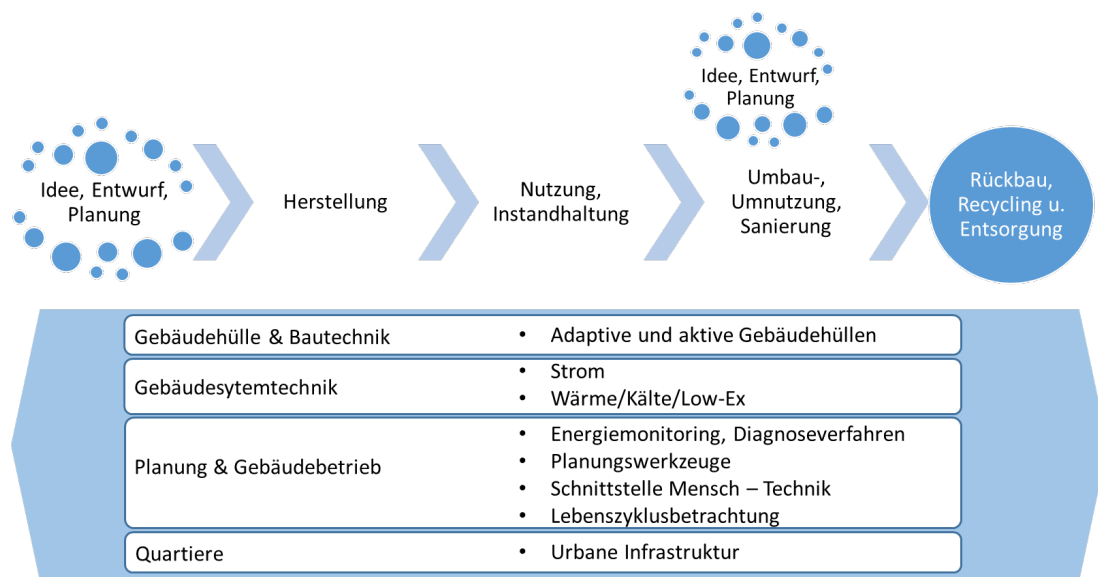


Abb. 1-4 Lebenszyklusphasen eines Gebäudes und identifizierte Innovationsfelder entsprechend der Expertenempfehlungen des Forschungsnetzwerkes Energie in Gebäuden und Quartieren

Quelle: PTJ (2015)

Des Weiteren sind in Abb. 1-4 die vom Forschungsnetzwerk Energie in Gebäuden und Quartieren identifizierten Innovationsfelder genannt. Während die Innovationsfelder *adaptive und aktive Gebäudehüllen*, *Strom/Wärme/Kälte/Low-Ex*, *Schnittstelle Mensch-Technik*, *Lebenszyklusbetrachtungen*, *Planungswerkzeuge*, *Energiemonitoring* und *Diagnoseverfahren* den Themenfeldern Gebäudehülle, Gebäudesystemtechnik und Gebäudebetrieb/Planung zugeordnet werden können, handelt es sich bei dem Innovationsfeld *Urbane Infrastrukturen* um ein Schnittstellenthema im Bereich Gebäude-Quartier. Daher wird die Quartiersperspektive aus der Gebäudesicht in einem getrennten Kapitel behandelt.

1.3 Zukünftige Entwicklung und Entwicklungshemmnisse

Für den Gebäudesektor sind folgende Entwicklungen relevant:

- Es besteht in Deutschland ein Trend zu Ein-Personen-Haushalten, gleichzeitig steigt die durchschnittliche Lebenserwartung an, was mit einer Zunahme der beheizten Wohnfläche einhergeht.
- Die Klimaerwärmung sowie Nutzeranforderungen verursachen einen erhöhten Bedarf an klimagerechter Gebäudekühlung (Bettgenhäuser et al. 2011; Voss und Künz 2012). Insbesondere die Ertüchtigung des Gebäudebestandes und energieeffiziente Konzepte bei Neubauten stellen große Herausforderungen dar.
- Die energetische Sanierungsrate liegt derzeit bei knapp 1 %/a (BMWi 2010; dena 2012). Ursachen sind hier lange Amortisationszeiträume und die aktuell niedrigen Energiepreise. Damit besteht vor allem bei den älteren Entscheidern im privaten Bereich eine große Zurückhaltung. Die Entscheidung zur Sanierung wird nach dem aktuellen Bedarf (Reparatur, Instandsetzung) getroffen (Rein und Schmidt 2016). Dennoch stellen energetische Sanierungsmaßnahmen ein wichtiges Handlungsfeld in Deutschland, aber auch in vielen anderen hochentwickelten Indust-

rienationen, dar. Hemmnisse bei der Sanierung sind ein an den Bedürfnissen angepasster rechtlicher und regulatorischer Rahmen und zunehmend verschärfte Anforderungen hinsichtlich Brandschutz und Sicherheit. Insbesondere im Mietbetrieb ist die Akzeptanz aufgrund erhöhter Mietpreise sehr gering. Daneben existiert eine Diskrepanz zwischen theoretischen und realen Einsparungen, die zu einem Vertrauensverlust bei energetischen Sanierungen geführt hat.

- Bis zum Jahr 2050 will die Bundesregierung einen nahezu klimaneutralen Gebäudebestand realisieren. Die Europäische Union hat mit der Direktive 2010/31/EU (EPBD recast) Niedrigstenergiegebäude (Nearly Zero Energy Buildings, NZEB) als Gebäudestandard ab 2021 festgeschrieben (EU 2010).
- Planung, Erstellung und Betrieb eines Gebäudes werden zukünftig noch stärker eine integrale, multidisziplinäre Aufgabe darstellen.
- Gebäude, insbesondere Neubauten, werden verstärkt hinsichtlich ihres ökologischen Fußabdrucks über den Lebenszyklus, insbesondere ihres kumulierten Gesamtenergieaufwands, bewertet. Dies beeinflusst die Wahl der eingesetzten Baumaterialien und Bauweisen.
- Quartierskonzepte erfordern ebenso einen integralen Ansatz für Planung, Erstellung und Betrieb von Gebäuden und deren Vernetzung.

Der Einbringung von Innovationen in den Gebäudesektor stehen verschiedenste typische allgemeine Hemmnisse gegenüber, die hier im Folgenden aufgeführt sind:

- In einer stark fragmentierten Branche besteht ein starker Preiskampf, der nach schnellen, unkomplizierten Standardlösungen verlangt und wenig Raum für Innovationen lässt.
- Es existiert ein heterogener Gebäudebestand, der Standardlösungen zum Teil erschwert.
- Komplexere Systemlösungen können durch die vorherrschende Gewerketrennung oftmals nur von Systemanbietern angeboten werden.
- Energieeffizienztechnologien können eine höhere Investitionssumme als Standardlösungen erfordern, was dann aufgrund längerer Payback-Zeiten zu ungünstigen Business Case Szenarien führt.
- Die Dauer von Innovationsprozessen im Gebäudebereich sind im Vergleich zu anderen Branchen meist lang und Innovationen können aufgrund der langen durchschnittlichen Sanierungszyklen nur zu wenigen Zeitpunkten im Gebäude umgesetzt werden.

International trägt der Gebäudesektor mit einem Anteil von über 30 % maßgeblich zum Gesamtendenergiebedarf bei. Gleichzeitig sind damit ca. 30 % der globalen Treibhausgasemissionen verbunden (UNEP 2016). Durch den bestehenden hohen Energiebedarf bietet der Gebäudesektor damit ein hohes Energieeinsparpotenzial. Dieses wird weltweit auf ca. 40 % für das Bezugsjahr 2035 geschätzt (IEA 2012). In vielen Ländern spielen deshalb Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung in Gebäuden eine große Rolle und sind Bestandteil national festgelegter Beiträge zur Treibhausgasemissionsminderung (OECD/IEA 2016). Die weltweiten Ausgaben für energieeffiziente Technologien und Dienstleistungen für Gebäude beliefen sich 2015 auf ca. 360 Mrd. Euro (OECD/IEA 2016). Zukünftige Anstrengungen werden im Wesentlichen in drei Bereichen gefordert sein:

- Verbesserte Planungs- und Konstruktionstechniken,
- energetische Sanierung von Gebäuden und Gebäudekomponenten sowie
- verbessertes Energiemanagement.

Für die Beschreibung von Forschungs- und Entwicklungsaspekten im Bereich energieeffizienter Gebäude und Quartiere ist generell die Betrachtung folgender Anwendungsbereiche relevant:

- Gebäudehülle und Bautechnik,
- Gebäudesystemtechnik und
- Planung und Gebäudebetrieb.

Die Anwendungsbereiche Gebäudehülle (Fassaden und Dach), Bautechnik und Gebäudesystemtechnik (HLK-Systeme, Beleuchtung, Automation) bilden das Gebäude ab. Allerdings ist eine klare Zuordnung von Technologien zu einem der beiden vorgenannten Anwendungsbereiche nicht immer möglich. Energieflüsse über die Gebäudehülle können über multifunktionale Komponenten (z. B. schaltbare Verglasungen) durch die Gebäudeautomation gesteuert und geregelt werden. In diesen Fällen erfolgt die Zuordnung über die Lokalisierung der Technologie im Gebäude. Das Feld Planung und Gebäudebetrieb behandelt Werkzeuge, Verfahren, Praktiken und Prozesse, die in den unterschiedlichen Lebenszyklusphasen eines Gebäudes Anwendung finden.

Im Folgenden werden die in Tab. 1-1 angegebenen Technologien anhand des vorgegebenen Kriterienrasters evaluiert.

Tab. 1-1 Überblick über die untersuchten Technologien des Technologiefelds energieeffiziente Gebäude und Gebäudetechnik

Gebäudehülle und Bautechnik	Gebäudesystemtechnik	Planung und Gebäudebetrieb
T1: Hochleistungswärmedämmung	T6: Gebäudeautomation	T10: Informationsmanagement
T2: Funktionelle optische Oberflächen	T7: Wärmespeicher	T11: Life Cycle Assessment
T3: Transparente und transluzente Fassadenelemente	T8: Stromspeicher	T12: Energiemanagementsysteme
T4: Ressourcenschonendes Bauen	T9: Heiz-, Lüftungs- und Klimatisierungssysteme (low-Ex-Systeme)	T13: Monitoring, Diagnose
T5: Multifunktionale Gebäudehülle		T14: Nutzer-Gebäude Beziehung

Entsprechend dieser Gliederung wird im Folgenden auch die Bewertung durchgeführt.

2 Anwendungsbereich Gebäudehülle und Bautechnik

2.1 Beschreibung

Ein wichtiger Ansatzpunkt für die Steigerung der Energieeffizienz ist die Gebäudehülle (Fassade, Dach). Diese bestimmt maßgeblich den Energiebedarf eines Gebäudes. Über sie wird das Gebäude mit Tageslicht versorgt, finden Wärmeverluste während der Heizperiode und unerwünschte Wärmeeinträge in den Sommermonaten statt. Die Gebäudehülle bietet die Applikationsflächen für Photovoltaik- und Solarthermieranwendungen am Gebäude. Durch diese unterschiedlichen Funktionen (Wärme- und Lichtmanagement, Lüftung und Energiebereitstellung) erfolgt in Zukunft eine noch engere Verzahnung mit der Gebäudesystemtechnik. Die Gebäudehülle stellt die Außenansicht der Gebäude dar und muss daher auch ästhetischen Ansprüchen genügen. Darüber hinaus trägt deren Luftdichtigkeit verbunden mit kontrollierter Belüftung maßgeblich zur Energieeffizienz bei.

Der Einsatz neuer Technologien kann bei Neubauten ohne größere Probleme erfolgen, wohingegen die Implementierung im Gebäudebestand oftmals eine besondere Herausforderung darstellt – insbesondere, wenn hohe Energiestandards (Passivhausstandard) erreicht werden sollen. Das Potenzial einer Technologie bestimmt sich daher auch durch die Anwendbarkeit im Altbau.

Im Bereich der Bautechnik beeinflusst die prinzipielle Art der Bauweise (z. B. Massivbau, Leichtbau, Holz- oder Membranbau) die Gesamtenergie- und Ökobilanz eines Gebäudes und kann durch thermische Aktivierung selbst als Wärmespeicher fungieren. Ausgehend von den Komfortansprüchen des Nutzers ist ein unterschiedliches Maß an Gebäudesystemtechnik oder funktionalisierter Baumaterialien im Gebäude einzusetzen.

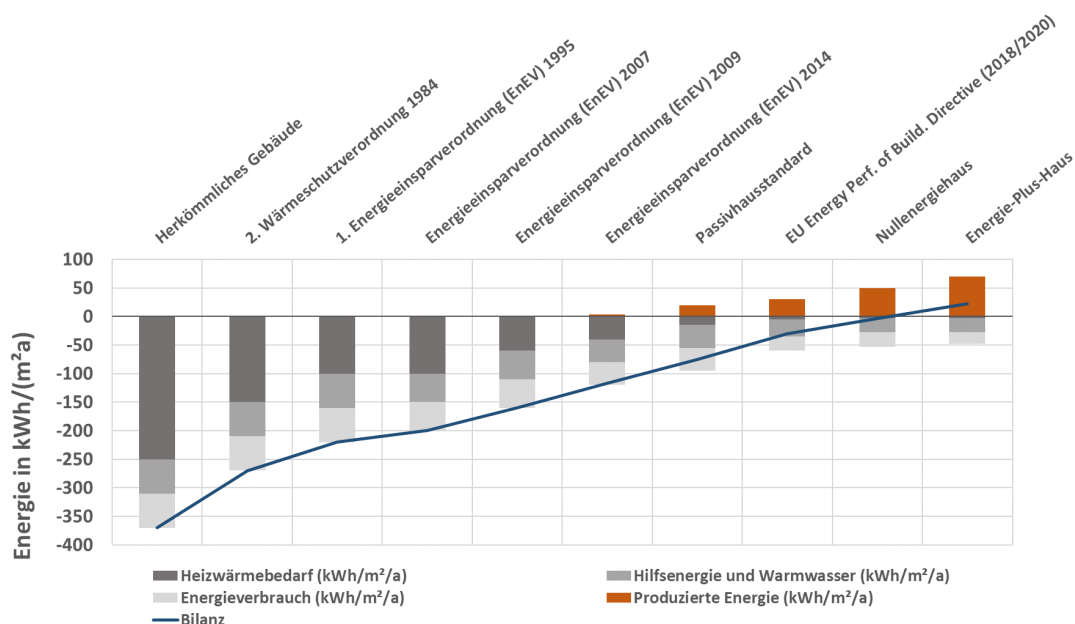


Abb. 2-1 Entwicklung des Energiestandards von Gebäuden untergliedert in verwendete, produzierte Energie und zusätzlich als Gesamtbilanz

In Abb. 2-1 ist die Entwicklung des Energiebedarfs von Gebäuden dargestellt, dessen Reduktion maßgeblich von den verschiedenen Verordnungen und Standards vorangetrieben wurde. Auffällig ist, dass die Aufteilung des Energieverbrauches einem starken Wandel unterliegt. Während der Heizwärmeverbrauch bei herkömmlichen Gebäuden nahezu 70 % beträgt, sinkt er bei hocheffizient gedämmten Gebäuden auf ca. 6 %. Der Anteil „Hilfsenergie und Warmwasser“ hingegen steigt von 16 % auf 52 % an. Die Relevanz dieser beiden Beiträge ist daher in Zukunft gleichwertig zu gewichten.

Beschreibung T1: Hochleistungswärmedämmungen

Wärmedämmstoffe müssen idealerweise neben herausragenden Dämmeigenschaften und anderen bauphysikalischen Eigenschaften preiswert, sicher zu verarbeiten, langzeitstabil und rezyklierbar sein. Benötigt werden Hochleistungsdämmstoffe, die schlanke Wandaufbauten ermöglichen und besonders in der Altbausanierung eingesetzt werden können. Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht im Bereich der belüfteten Hochleistungswärmedämmungen, wie sie beispielsweise mit Aerogelen realisiert werden können.

Im Vorgängerbericht Energietechnologien 2050 (Wietshel et al. 2010) wurden Hochleistungswärmedämmungen ausführlich behandelt. So wurde bei Vakuumisulationspaneelen ein Kostensenkungsbedarf und Entwicklungsbedarf hinsichtlich der Langzeitstabilität festgestellt. In Bezug auf die mikroporöse Dämmstoffklasse der Aerogele wurde ebenfalls ein Kostensenkungsbedarf in Bezug auf die bekannten Herstellungsverfahren angemerkt. Systeme zur Innendämmung wurden als weitgehend entwickelt dargestellt. Eine explizite Förderempfehlung für die öffentliche Hand wurde nicht ausgesprochen.

Der Dämmstoffmarkt wird von den klassischen Dämmstoffprodukten Kunststoffschäume und mineralische Faserdämmstoffe dominiert. Die Wärmeleitfähigkeitswerte bewegen sich hier im Bereich von ca. 0,030 bis 0,065 W/(mK). Von Hochleistungsdämmstoffen spricht man, wenn die Materialien Wärmeleitfähigkeiten von kleiner 0,026 W/(mK) aufweisen und damit die Wärmeleitfähigkeit der ruhenden Luft unterschritten ist. Kommerziell sind wenige Hochleistungswärmedämmungen verfügbar, beispielsweise in Form der Vakuumisulationspaneele (typische effektive Wärmeleitfähigkeiten von 0,005 W/(mK) oder als nanoporöse Dämmstoffe, z. B. auf Aerogelbasis mit Wärmeleitfähigkeiten unter 0,020 W/(mK). Hochleistungsdämmstoffe sind aufgrund ihrer höheren Kosten bisher Nischenprodukte und werden meist dort eingesetzt, wo kommerzielle Dämmstoffe aus Platzgründen nicht eingesetzt werden können oder besonders schlanke hochwärmegedämmte Wandaufbauten gewünscht sind.

Beschreibung T2: Funktionelle optische Oberflächen

Der Spektralbereich der solaren Einstrahlung erstreckt sich vom UV über das sichtbare Licht bis zum nahen Infrarot, wobei etwa 5 % der Einstrahlung im ultravioletten Bereich liegen, 50 % im sichtbaren und 45 % im nahen Infrarot. Die Wärmeabstrahlung einer Oberfläche bei Raumtemperatur findet im mittleren Infrarot statt.

Low-e Oberflächen

Oberflächen mit einem geringen Emissionsgrad im mittleren Infrarot zwischen 3 μm bis 50 μm werden als low-e Oberflächen bezeichnet, welche nur wenig Wärmestrahlung an die Umgebung abgeben und gleichzeitig die aus der Umgebung auftreffende Wärmestrahlung wieder zurück reflektieren. Dadurch lässt sich der Wärmeübergang zwischen der Oberfläche und der Umgebung und damit verbunden der Wärmedurchgangskoeffizient einer Konstruktion vermindern. Darüber hinaus kann durch innenseitige low-e Oberflächen die thermische Behaglichkeit im Innenraum erhöht werden, während durch außenseitige low-e Oberflächen der Tauwasserausfall auf der Fassade reduziert wird. Insgesamt ermöglicht dies die Einsparung sowohl von Heiz- als auch von Kühlenergie im Gebäude. Eine zusätzliche interessante Komponente stellt die regelbare Einstellung des Emissionsgrades einer schaltbaren low-e Schicht im Gebäudebereich dar.

Reflektierende und nichtreflektierende optische Oberflächen (cool roofs)

Abhängig von der jeweiligen Klimazone können Oberflächen mit maßgeschneiderten spektralen Eigenschaften die Energieeffizienz von Gebäuden deutlich erhöhen. Der Einsatz von Oberflächen mit einem hohen solaren Reflexionsgrad sowie einem hohen thermischen Emissionsgrad im Dachbereich (cool roofs) ermöglicht z. B. eine Reduktion der zur Klimatisierung notwendigen Energie um bis zu 15 % (U.S. Department of Energy 2010). Dagegen können Flächen mit einem hohen solaren Absorptionsgrad den Wärmeeintrag ins Gebäude erhöhen und in kälteren Klimaregionen eine Einsparung an Heizenergie bewirken. Vorteilhaft ist hier auch die Kombination mit anderen Technologien, wie beispielsweise schaltbarer Wärmedämmung, um die Vorteile der jeweiligen Ansätze optimal zum Tragen zu bringen.

Beschreibung T3: Transparente/transluzente Elemente

Unter dem Bereich transparente/transluzente Systeme wurde maßgeblich Dreifachisolierverglasung und Vakuumverglasung im Vorgängerbericht aufgeführt. Wie dort bereits festgestellt, ist Dreifachisolierverglasung kommerziell verfügbar und hat mittlerweile im Neubau Zweifachisolierverglasung weitestgehend verdrängt. Vakuumisolierverglasung wurde zu recht ein sehr hohes technisches Entwicklungsrisiko zugewiesen, wie die trotz hoher FuE-Anstrengungen noch ausstehende Kommerzialisierung bestätigt. Zu dem damaligen Zeitpunkt wurde dennoch keine spezifische Förderempfehlung für Vakuumisolierverglasung ausgesprochen.

Isolierverglasung

Isoliervergläser bestehen aus zwei oder mehr Glasscheiben, die einen Abstand, den Scheibenzwischenraum, aufweisen. Zur Reduktion des Wärmedurchganges ist der Scheibenzwischenraum mit einem Edelgas mit geringerer Wärmeleitfähigkeit als Luft – üblicherweise Argon – gefüllt. Zusätzlich werden niedrigemittierende Beschichtungen eingesetzt um die Wärmestrahlung zu unterdrücken. Durch Anpassung der Gläser und Beschichtungen kann die Transmission in gewissen Bereichen eingestellt werden um Wärmeeinträge gezielt zu erlauben (Wärmedämmverglasung) oder zu minimieren (Sonnenschutzverglasung).

Vakuumverglasung

Im Vergleich zu modernem Drei-Scheiben-Wärmedämmglas mit Edelgasfüllung sind mit Vakuumisolierglas niedrigere U_g -Werte bei extrem schlankem Aufbau von 8 mm realisierbar - bei gleichzeitig geringerem Gewicht und weniger Materialeinsatz. Außerdem können bestehende Zweischeiben-Verglasungen durch eine neuartige gleich dicke Dreischeibenverglasung aus Vakuumisolierglas und zusätzlicher Isolierglas-scheibe mit weiter verbesserter Dämmung ersetzt werden.

Tageslichtsysteme

Unter Tageslichtsysteme fallen neben feststehenden passiven und beweglichen regelbaren Sonnenschutzsystemen auch Blendschutz-, Tageslichtlenk- und transluzente Systeme.

Feststehende, passive Sonnenschutzsysteme nutzen die jahreszeitlich bedingte Änderung des Sonnenstands, um Sonnenlicht im Winter zur Raumausleuchtung und Heizungsunterstützung in das Gebäude zu lassen und im Sommer den Energieeintrag zu begrenzen. Bewegliche, regelbare Systeme ermöglichen eine optimierte Tageslichtnutzung. Selektive Beschichtungen auf Außenlamellen lassen das Tageslicht im sichtbaren Bereich in das Gebäudeinnere und absorbieren den IR-Anteil des Sonnenlichts. Außenliegende Systeme sind effizient, allerdings bei höheren Windlasten problematisch. Zwischenliegende Systeme, wie beispielsweise zwischen zwei Scheiben liegende Lamellen, sind gut gegen Wind und Verschmutzung geschützt. Bei reinen Blendschutzsystemen handelt es sich um innenliegende Jalousien, Rollos oder Vorhänge. Hier empfehlen sich low-e Beschichtungen, um die Wärmeabstrahlung nach innen zu reduzieren.

Tageslichtlenksysteme (verspiegelte Systeme, prismatische Verglasungen, Glasfasern, strukturiertes Glas) ersetzen keine Verglasungen, sondern werden teilweise als Oberlichter, Deckenelemente oder Lichtkamine eingesetzt und erhöhen die blendfreie Raumausleuchtung mit Tageslicht. Ebenso wie transluzente Systeme, die das Tageslicht diffus in das Gebäude einbringen, oder Milchgläser, Vliese oder Aerogelverglasungen, die als transluzente Wand- und Deckenelemente Anwendung finden.

Beschreibung T4: Ressourcenschonendes Bauen

Nachwachsende und rezyklierbare Baustoffe

Hinsichtlich der Vermeidung von CO₂-Emissionen und der Ressourcenschonung bildet der Einsatz von nachwachsenden und/oder wiederverwendbaren Baumaterialien ein hohes Potential. In Bezug auf die Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden sind hier nachwachsende Wärmedämmstoffe zu nennen. Der Inhalt an grauer Energie¹ und die CO₂-Bilanz kann bei diesen Materialien deutlich geringer ausfallen als bei herkömmlichen Wärmedämmungen. Allerdings weisen Naturdämmstoffe auch insgesamt höhere Wärmeleitfähigkeitswerte auf, was zu höheren Dämmstoffstärken bei vergleichbaren Wärmedämmstandards führt (LfU 2009; Bundestag 2016). Na-

¹ Graue Energie bezeichnet den indirekten Energiebedarf eines Produkts oder einer Dienstleistung. Damit ist der Energiebedarf gemeint, der z. B. für die Herstellung, den Transport und Entsorgung eines Produktes benötigt wird.

turdämmstoffe hatten im Jahr 2011 einen Anteil von ca. 7 % am Gesamtdämmstoffmarkt im Bauwesen (100 % = 2,03 Mio. m³ Dämmstoff).

Die Wiederverwertung von Abfällen aus Bau- und Abbrucharbeiten bietet die Chance den Inhalt an grauer Energie bei Gebäuden zu reduzieren und deren CO₂-Bilanz und Wirtschaftlichkeit zu verbessern. Bis zum Jahr 2020 sollen hier mindestens 70 Gewichtsprozent der nicht gefährlichen Abfälle wiederverwendet oder der stofflichen Verwertung zugeführt werden (EU 2008). Die Kosten für Bauschutt betrugen 2015 zwischen 60 und 80 €/m³, entsprechend 5 bis 10 % der Herstellungskosten. In diesem Zusammenhang ist es wichtig, dass Baukomponenten und –systeme einfach und ohne großen Energie- und Ressourcenaufwand stofflich getrennt werden können. Damit kommt z. B. nicht klebenden oder verschweißten Verbindungen bei mehrschichtigen Gebäudebauteilen eine besondere Bedeutung zu (BMUB 2015).

Textiles Bauen

Neben den konventionellen Baustoffen wie Stein, Holz, Metall und Glas rücken verstärkt neuartige leichte und flexible Konstruktionen aus Membranen in den Blickpunkt der Architekten, so dass Membranen häufig auch als fünfter Baustoff bezeichnet werden. Der Begriff Membran umfasst neben Geweben auch Folien. Die textile Architektur bietet dabei neue gestalterische und bautechnische Anwendungsmöglichkeiten mit denen sich dem Planer ein großer Spielraum bei der Konstruktion erschließt und das textile Bauen kann somit einen wichtigen Beitrag zur Energieeinsparung in Gebäuden liefern und zwar sowohl Heiz- als auch Kühl- und Beleuchtungsenergie. Zusätzlich zur Reduktion des Energiebedarfs durch solare Energiegewinne und Lichteintrag ins Gebäude kann auch der Bedarf an grauer Energie durch leichte Konstruktionen mit geringem Gewicht um 15 % bis 19 % im Vergleich zu Massivbauten vermindert werden (Knippers 2010). Durch den Einsatz von transparenten Membranen als Innenhofüberdachung von Bestandsgebäuden kann der Primärenergiebedarf für die Erstellung im Vergleich zu einer Glasüberdachung sogar um bis zu 45 % gesenkt werden (Lang et al. 2012).

Grüne Gebäudehüllen

In Quartieren verstärken sich stadtklimatische Effekte, die aus einem hohen Bebauungs- bzw. Versiegelungsgrad resultieren. Das Stadtklima verändert die regionalen und lokalen Klimabedingungen. Im Vergleich mit dem Umland sind z. B. eine weitere Erwärmung, höhere Maximaltemperaturen und eine höhere Wärmespeicherung typisch. Wie sich diese Effekte ausprägen, ist stark von Art und Ausmaß der baulichen Nutzung, der Stadtstruktur sowie standörtlicher und lokalklimatischer Besonderheiten abhängig. Sie verschärfen aber die Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz und die Klimatisierung von Gebäuden im urbanen Umfeld. Hier können Begrünungen als wichtiger Baustein einer dynamisch reagierenden, energetisch effizienten und klimatisch ausgleichenden Gebäudehülle (Fassade und/oder Dach) wirken. Durch die Beeinflussung des Mikroklimas an der Gebäudehülle sind positive Effekte für den urbanen Raum als auch für das Raumklima innerhalb von Gebäuden zu erwarten (UBA 2012; Pfoser et al. 2013; Susorva 2015; Hoelscher et al. 2016).

Beschreibung T5: Multifunktionale Gebäudehülle

Multifunktionale Komponenten der Gebäudehülle übernehmen neben Funktionen wie Wärme-, Schall- und Witterungsschutz meist eine oder mehrere Zusatzfunktionen, die im Berichtskontext insbesondere auf die Erhöhung der Gebäudeenergieeffizienz und der Behaglichkeit von Raumnutzern abzielen. Zum Einsatz kommen hierbei bspw. Komponenten zur Klimatisierung des Gebäudeinneren oder Photovoltaiksysteme zur Stromgewinnung. Dabei steht vorwiegend die Nutzung von solarer Energie – auch unter Berücksichtigung vom saisonal anfallenden Wärmebedarf des Gebäudes – im Fokus. Hierzu kommen aktive bzw. adaptive Komponenten zum Einsatz, die eine bedarfsorientierte Nutzung ermöglichen.

Schaltbare Wärmedämmung (SWD)

Die Schaltbare Wärmedämmung (SWD) leitet im Winter solare Wärme durch nicht-transparente Fassadenflächen ins Gebäudeinnere und weist bei geringem solaren Angebot einen hohen Wärmeschutz auf. Auch eine Gebäudekühlung in kalten Sommernächten wird durch die SWD ermöglicht.

Fassadentemperierung

Das Heizen und Kühlen des Gebäudeinneren lässt sich auch durch eine aktive Fassadentemperierung mittels wasserdurchflossener Rohrregister umsetzen. Wie bereits unter dem Punkt Ressourcenschonendes Bauen erwähnt, stellt eine bewässerte Fassadenbegrünung eine weitere Möglichkeit zur Gebäudekühlung dar und trägt insbesondere in Stadtklimata zu einer Erhöhung der Luftqualität (Reduzierung CO₂, NO_x, Feinstaub) bei.

Wärmespeicher in der Fassade

Die Fassade dient darüber hinaus als thermischer Kurzzeitspeicher, indem Wärme sensibel in massiven Baustoffen wie Beton oder latent durch Phasenwechselmaterialien (PCM), insbesondere im Leichtbau, gespeichert wird. Eine Umsetzung im Neubau stellt sich einfach dar, während der Aufwand der thermischen Aktivierung bei Gebäuden im Bestand hoch ist.

Schaltbare Verglasung

Schaltbare Verglasungen zeichnen sich durch einen variablen Transmissionskoeffizienten bzw. Gesamtenergiedurchlassgrad aus. Als Nutzen sind die Vorbeugung sommerlicher Überhitzung, der Wärmegewinn im Winter sowie ein bedarfsorientierter Blend- und Sichtschutz zu nennen. Die Schaltbarkeit basiert insbesondere auf elektro-, gaschromen oder thermotropen Schichten in der Verglasung. Auch adaptive Fassadenelemente mit temperatur- und feuchteabhängiger Morphologie ermöglichen Eigenschaften schaltbarer Verglasungen, allerdings nicht aktiv bei Bedarf.

BIPV und BIST

Die Integration von Photovoltaik und Solarthermie in die Gebäudehülle erweitert die Möglichkeiten der Nutzung erneuerbarer Energien am Gebäude. Sowohl für die gebäudeintegrierte Photovoltaik (BIPV) als auch die gebäudeintegrierte Solarthermie

(BIST) existieren verschiedene Integrationsmöglichkeiten wie vorgehängte, hinterlüftete Lösungen und die Einbettung in Wärmedämmverbundsysteme. Die Integration in Isolierverglasungen (Zwei- und Dreischeibenverglasung) ist vor allem bei BIPV verbreitet. Die unterschiedlichen PV- und ST-Technologien bestimmen dabei das Erscheinungsbild sowie die Energieerzeugung pro Flächeneinheit. Dabei übernehmen das BIPV- bzw. BIST- Element neben der reinen Energiegewinnung gleichzeitig die Funktion des eigentlichen Bauelements, wie etwa Schallschutz, Wärmeschutz, o. ä.

FI-HLK

Fassadenintegrierte HLK-Systeme nutzen Gebäudewände zur mechanischen Belüftung von Räumen durch Ventilation und finden vorwiegend bei Passivhäusern Einsatz. Raumkonditionierung kann direkt über Innenwände oder über Deckenöffnungen stattfinden. Dabei gibt es oftmals dezentrale Raumlösungen mit Belüftungsöffnungen in der Fassade, aber auch zentrale fassadenintegrierte HLK-Systeme, meist in Verschaltung mit einer Wärmepumpe und einer Wärmerückgewinnung.

Solare Hybridsysteme

Solare Hybridsysteme verschalten thermisch sowie optisch funktionale Komponenten zur Erhöhung der Energieeffizienz der Fassade. Bspw. kann durch Adaption thermischer Hochleistungskurzzeitspeicher an fassadenintegrierten PV-Modulen die Energieeffizienz erhöht werden, da Temperaturspitzen reduziert werden.

Solare Systeme treten oftmals in Flächenkonkurrenz zueinander. Hier bieten hybride Ansätze Vorteile, da sie mehrere Technologien miteinander vereinen und so gezielt zu gleichzeitigen wichtigen Mehrfunktionen am Gebäude führen. Als Beispiel können hier Photovoltaik-Solarthermie (PV-T) Kollektoren genannt werden.

2.2 Relevanz öffentlicher Förderung

2.2.1 Kriterium 1: Vorlaufzeiten

Der Anwendungsbereich Gebäudehülle ist stark heterogen aufgebaut, wodurch sich für die unterschiedlichen Technologien verschiedene Vorlaufzeiten ergeben. Eine Abhängigkeit von den Szenarien ist nicht vordergründig ersichtlich und deshalb werden diesbezüglich keine Unterscheidungen getroffen.

**Tab. 2-1 Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung von Technologien im Anwendungsbe-
reich Gebäudehülle und Bautechnik**

Abhängig von den verschiedenen Szenarienentwicklungen und öffentlicher Förderung ist mit der ersten kommerziellen Anwendung der weiterentwickelten Technologie in Deutschland zu rechnen ...

T1: Hochleistungswärmedämmungen

Szenarienbereich DE_80 % bis 2020 ☐ bis 2030 ☒ bis 2040 ☐ bis 2050 ☐ nach 2050 ☐

Szenarienbereich DE_95 % bis 2020 ☐ bis 2030 ☒ bis 2040 ☐ bis 2050 ☐ nach 2050 ☐

T2: Funktionelle optische Oberflächen

Szenarienbereich DE_80 % bis 2020 ☐ bis 2030 ☒ bis 2040 ☐ bis 2050 ☐ nach 2050 ☐

Szenarienbereich DE_95 % bis 2020 ☐ bis 2030 ☒ bis 2040 ☐ bis 2050 ☐ nach 2050 ☐

T3: Transparente/transluzente Elemente

Szenarienbereich DE_80 % bis 2020 ☐ bis 2030 ☒ bis 2040 ☐ bis 2050 ☐ nach 2050 ☐

Szenarienbereich DE_95 % bis 2020 ☐ bis 2030 ☒ bis 2040 ☐ bis 2050 ☐ nach 2050 ☐

T4: Ressourcenschonendes Bauen

Szenarienbereich DE_80 % bis 2020 ☐ bis 2030 ☐ bis 2040 ☐ bis 2050 ☒ nach 2050 ☐

Szenarienbereich DE_95 % bis 2020 ☐ bis 2030 ☐ bis 2040 ☐ bis 2050 ☒ nach 2050 ☐

T5: Multifunktionale Gebäudehülle

Szenarienbereich DE_80 % bis 2020 ☐ bis 2030 ☒ bis 2040 ☐ bis 2050 ☐ nach 2050 ☐

Szenarienbereich DE_95 % bis 2020 ☐ bis 2030 ☒ bis 2040 ☐ bis 2050 ☐ nach 2050 ☐

Vorlaufzeiten T1: Hochleistungswärmedämmungen

Hochleistungswärmedämmungen sind bereits auf dem Markt verfügbar. Jedoch sind abhängig von der Materialwahl und Syntheserouten diese Systeme kostenintensiv und/oder schwierig in der Verarbeitung. Neue Entwicklungsansätze befinden sich noch im Labormaßstab bzw. in der Skalierungsphase.

Vorlaufzeiten T2: Funktionelle optische Oberflächen

Low-e Oberflächen finden als transparent leitfähige Schichten bereits großflächigen Einsatz in der Verglasungsindustrie, während opake low-e Oberflächen mit maßgeschneidertem Farbeindruck auf Fassaden bisher nur in Einzelanwendungen eingesetzt werden. Forschungsbedarf besteht hier, neben der Applikation von transparenten low-e Oberflächen auf flexiblen Membranen, vor allem hinsichtlich einer Optimierung der wellenlängenabhängigen Eigenschaften und der Stabilität sowie in der Implementierung adaptiver Eigenschaften zur regelbaren Variation des Emissionsgrades.

Die existierenden Oberflächen mit hohem solaren Reflexionsgrad eignen sich bereits für den Einsatz im Zusammenhang mit „cool roofs“. Forschungsbedarf besteht speziell in der Applikation der Oberflächen zur optimalen Einsparung von sowohl Kühl- und Heizenergie als auch in der Weiterentwicklung der Oberflächen und der gezielten Modellierung der spektralen Oberflächeneigenschaften in den maßgeblichen Wellenlängenbereichen.

Vorlaufzeiten T3: Transparente/transluzente Elemente

Die Vorlaufzeit bis zur Marktreife kann für die verschiedenen Technologien nur als Bandbreite angegeben werden, weshalb sich Markteinführungen bis zum Jahr 2030 erstrecken. Ein wesentlicher Verzögerungsfaktor im Gebiet transparenter bzw. transluzenter Elemente sind umfangreiche Zulassungsprüfungen und -bestimmungen.

Vorlaufzeiten T4: Ressourcenschonendes Bauen

Die Realisierung ressourceneffizienter Gebäude auf der Basis hochwertiger recycelbarer Baukomponenten bedarf der Materialentwicklung und -optimierung, der Zulassung und der Etablierung geschlossener Stoffkreisläufe. Die Vorlaufzeiten sind je nach Entwicklungstiefe in ausreichender Größe und in einer großen Bandbreite bis hin zum Jahr 2050 anzunehmen.

Vor allem bei großformatigen Bauprojekten, wie Stadien- oder Hallendächern werden bereits verstärkt Membrankonstruktionen eingesetzt. Hinsichtlich des Einsatzes von Membranen im Gebäudebestand gibt es allerdings noch Forschungsbedarf. Darüber hinaus besteht hauptsächlich bei einer Verbesserung der thermischen und bauphysikalischen Eigenschaften, wie Wärmedämmung, Kondensationsproblematik, etc. bis etwa 2030 Forschungsbedarf.

Konventionelle Begrünungen von Fassaden und Dächern sind verfügbar. Die Umsetzung von innovativen, leistungsfähigen hybriden Hüllentechnologien aus der Kombination von Grün- und Fassadentechnologie benötigt Vorlaufzeiten für FuE und Demonstrations- und Evaluationsphasen bis 2030.

Vorlaufzeiten T5: Multifunktionale Gebäudehülle

Es werden bereits BIPV-Produkte in verschiedener Ausführung in Bauprojekten eingesetzt, vorwiegend in Großprojekten mit gewissem Leuchtturm-Charakter. Verwendet werden dabei überwiegend in einer Verglasung integrierte PV. Aufgrund des Sonder- bzw. Einzelanfertigungscharakters, sind die Kosten aktuell noch um ein Vielfaches höher als Standard-PV Module.

Die System- und Komponentenweiterentwicklung von BIPV erstreckt sich bis 2020 mit erwarteter Marktreife bis 2030. Hierbei ist insbesondere der FuE-Bedarf bezüglich der Optimierung des dynamischen Verhaltens unter Realbedingungen (z. B. dynamische Verschattung) und der dazu benötigten elektrischen Komponenten (z. B. Microinverter), sowie hinsichtlich einer architektonisch und optisch ansprechenden Integration der PV in Fassadenelemente zu nennen.

Neue PV-Technologien (etwa Perowskit-PV) bedürfen noch einer grundlegenden Erforschung der Technologie selbst, bevor sie für die Integration verwendet werden

können. Eine realistische Zeitspanne ist hier deshalb 2030. Für die organische PV können neben der Integration in Verglasungen auch neue Fassadenkomponenten angedacht werden. Hierzu ist eine Vorlaufzeit bis 2025 anzusetzen.

Bei der gebäudeintegrierten Solarthermie (BIST) gibt es ebenso schon kommerziell erhältliche Produkte sowie realisierte Installationen. Auch hier handelt es sich hauptsächlich um Sonderanfertigungen und Pilotprojekte oder Einzelgebäude, mit entsprechend hohen Kosten. Eine Marktpenetration hat noch nicht stattgefunden. In den meisten Fällen geht es zudem um eine rein additive Installation und nicht um eine Integration mit tatsächlicher Übernahme von Funktionen der Gebäudehülle. Hier ist noch F&E-Bedarf in Hinblick auf die Konzeption und Erprobung von solar-aktivierten Fassaden- und Dachelementen. Für optimierte BIST-Produkte ist mit einer Vorlaufzeit bis 2030 zu rechnen.

Bei PV-T Kollektoren sind bereits erste Produkte am Markt erhältlich. Auch hier ist eine Weiterentwicklung des Systems bis 2020 und optimierte Produkte bis 2030 zu erwarten.

Bei der SWD ist mit Markteinführungen bis 2020 zu rechnen. Schaltbare Verglasungen sind seit mehreren Jahren am Markt verfügbar. Adaptive Fassadenelemente mit temperatur- und feuchteabhängiger Morphologie befinden sich in der Laborphase und sind erst ab 2030 als Produkt zu erwarten.

2.2.2 Kriterium 2: Forschungs- und Entwicklungsrisiken (technisch, wirtschaftlich, rohstoffseitig)

Teilkriterium 2.1 Entwicklungsstadium des Anwendungsbereiches Gebäudehülle und Bautechnik

Der Anwendungsbereich Gebäudehülle und Bautechnik ist heterogen, so dass sich keine einheitliche Aussage zum Entwicklungsstadium einzelner Technologien treffen lässt und hier vielmehr eine Bandbreite anzugeben ist. In Tab. 2-2 sind die aktuellen Entwicklungsstadien ausgewählter Technologien aufgeführt.

Tab. 2-2 Aktuelles Entwicklungsstadium des Anwendungsbereiches Gebäudehülle und Bautechnik

Grobklassifizierung	Feinklassifizierung	T1	T2	T3	T4	T5
Grundlagenforschung						
	TRL 1 – Grundlegende Prinzipien beobachtet und beschrieben, potentielle Anwendungen denkbar	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Technologieentwicklung						
	TRL 2 – Beschreibung eines Technologiekonzepts und/ oder einer Anwendung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	TRL 3 – Grundsätzlicher Funktionsnachweis einzelner Elemente einer Anwendung/Technologie	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	TRL 4 – Grundsätzlicher Funktionsnachweis Technologie/Anwendung im Labor	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Demonstration						
	TRL 5 – Funktionsnachweis in anwendungsrelevanter Umgebung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	TRL 6 – Verifikation mittels Demonstrator in anwendungsrelevanter Umgebung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	TRL 7 – Prototypentest in Betriebsumgebung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	TRL 8 – Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit in Betriebsumgebung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Kommerzialisierung						
	TRL 9 – Erfolgreicher kommerzieller Systemeinsatz	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

TRL= Technology Readiness Level

T1: Hochleistungswärmedämmungen, T2: Funktionelle optische Oberflächen, T3: Transparente/transluzente Elemente, T4: Ressourcenschonendes Bauen, T5: Multifunktionale Gebäudehülle

T1: Hochleistungswärmedämmungen

Unterschiedliche Systeme von Hochleistungswärmedämmungen, z. B. Vakuumisolationspaneele oder mikroporöse Dämmstoffe auf der Basis von Kieselsäuren, sind auf dem Markt verfügbar. Hier finden Optimierungen hinsichtlich der Leistungsfähigkeit und Reduktion der Kosten statt. Aerogel-basierte Dämmstoffe auf Silica-Basis sind ebenfalls bereits in der Anwendung und kommerziell erhältlich. Existierende Syntheserouten für Aerogele (Rohstoffe und/oder Produktionsverfahren) sind derzeit zu kostspielig. Neue erforderliche Syntheserouten und die Entwicklung von Kompositensystemen mit multifunktionalen Eigenschaften (z. B. wärmedämmend/mechanisch stabil) oder besonders materialarme leistungsfähige Wärmedämmsysteme befinden sich hier noch auf den unterschiedlichen Stufen der Technologieentwicklung. Lösungsansätze auf Laborskala müssen auf industrielle Erfordernisse hochskaliert werden. Dabei sind Lösungen besonders vorteilhaft, die einen funktionellen Mehrwert

erzeugen, beispielsweise bioinspirierte und/oder hybride Materialsysteme, die thermische, mechanische oder feuchtetechnische Eigenschaften gleichzeitig optimieren. Die Langzeitstabilität dieser Materialien ist zu klären.

Der BDI fordert in seinem Positionspapier „Prioritäten für die Energieforschung in Deutschland 2016“ für den Sektor Energieeffiziente Gebäude die Erforschung und Weiterentwicklung von Hochleistungswerkstoffen mit besonderer Wärmedämmwirkung (BDI 2016).

T2: Funktionelle optische Oberflächen

Low-e Oberflächen

Dünne low-e Schichten auf metallischer (i. d. R. Silber) oder halbleitender Basis (z. B. Fluor-dotiertes Zinnoxid) werden bereits in Wärmeschutzverglasungen eingesetzt und zeichnen sich neben einem geringen Emissionsgrad im Infraroten durch einen hohen Transmissionsgrad im Sichtbaren aus. Darüber hinaus gibt es erste Ansätze, neben Verglasungen auch Fassaden und Membranen mit low-e Farben bzw. Beschichtungen auszustatten, wobei bisher noch keine langzeitstabilen Produkte mit ausreichend geringem Emissionsgrad verfügbar sind.

Reflektierende und nichtreflektierende optische Oberflächen (cool roofs)

Weißer Oberflächen mit hohem solaren Reflexionsgrad sind bereits verfügbar. Weitere Entwicklungen zielen vor allem auf die Optimierung der spektral-selektiven Eigenschaften.

T3: Transparente/transluzente Elemente

Isolierglas

Stand der Technik im Bereich Isoliergläser sind Zwei- und Drei-Scheiben-Aufbauten mit U_g -Werten um $1,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ im Zweischeiben- bzw. $0,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ im Dreischeibenaufbau. Wird teures und nicht in großen Mengen verfügbares Krypton statt Argon als Füllgas verwendet, erreicht man etwas bessere U_g -Werte um $0,9 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bzw. $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Will man mit Isolierglas bessere Wärmedämmwerte erreichen, ist man auf Sonderlösungen wie z. B. Vierfachglas angewiesen. Beim Vierfachglas wird die Gewichtsproblematik, die bereits bei Dreischeibenaufbauten in großen Formaten vorliegt, noch deutlich verstärkt. Deshalb zielen die Forschungsarbeiten hier auf gewichtsreduzierende Maßnahmen z. B. durch Verwendung dünnerer Gläser oder Glasfolien sowie durch Verwendung von sehr leichten und dünnen Kunststofffolien.

Ein weiterer Gegenstand aktueller Forschung sind Verglasungen mit variablen Eigenschaften hinsichtlich Transmission und g-Wert, sogenannte schaltbare Verglasungen. Verglasungen in Kombination mit aktiven Komponenten werden im Bereich multifunktionelle Fassadenelemente separat behandelt.

Vakuumverglasung

Vakuumisoliertglas-Produkte aus Fernost weisen bereits heute U_g -Werte von $<0,5 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ auf, besitzen einen Evakuierstutzen im Sichtbereich und verwenden bleihaltige Lote. Die Stabilität dieser Produkte ist durch Verwendung vorgespannter Gläser mittlerweile sehr gut. Ähnlich wie bei solaroptischen Verglasungen bietet sich Vakuumverglasung für hybride Aufbauten an.

Tageslichtsysteme

Feststehende passive und bewegliche, regelbare Sonnenschutzsysteme sowie viele Arten von Blendschutzsystemen sind im Wesentlichen endentwickelt und zur Marktreife gebracht worden. Allerdings bringen zum einen neue Beschichtungen (low-e, selektiv) wichtige Verbesserungen, zum anderen sind zusätzliche Funktionen bzw. die Kombinationen mit anderen Aufgaben, wie beispielsweise PV-Module als Sonnenschutzlamellen, sehr interessant und effizient, so dass hier noch Forschungsbedarf besteht.

Im Bereich der Tageslichtlenksysteme und der transluzenten Systeme sind zwar etliche Systeme bereits auf dem Markt, aber auch hier besteht weiterer Forschungsbedarf, beispielsweise bei der Lichtrohrtechnik mit besser reflektierenden Oberflächen, höherer Lichtausbeute sowie der Kombination mit Kunstlicht und zusätzlich bezüglich der Optimierung der thermischen Eigenschaften. Durch neue Materialien und neue Fertigungstechnologien werden immer bessere Lichtlenksysteme entwickelt, die auch kostengünstig umsetzbar sind. Eine weitere noch junge Technologie sind Aerogelverglasungen bei denen die thermischen und optischen Eigenschaften weiter optimiert werden können. Schlussendlich wird auch im Bereich der Tageslichtlenksysteme die Kombination mit anderen Funktionen (Kühlung und Heizung, integriertes Kunstlicht) interessant. Diese multifunktionalen Decken- und Wandelemente mit Tageslichtnutzung sind noch im Forschungsstadium.

T4: Ressourcenschonendes Bauen

Nachwachsende und rezyklierbare Baustoffe

Wärmedämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen sind auf dem Markt verfügbar. Bestehendes Optimierungspotential und offene Fragestellungen bzgl. Brand-, Schall-, Wärme- und Feuchtigkeitsschutz, Nachhaltigkeit und Emissionen werden zum Teil in laufenden Forschungsvorhaben bearbeitet². Es finden auch vereinzelt neue Dämmstoffprodukte auf der Basis neuer pflanzlicher Rohstoffquellen Eingang in den Markt (Krus und Theuerkorn et al. 2013). Die Entwicklung konkurrenzfähiger ökologischer Dämmstoffprodukte oder sogar Hochleistungsdämmstoffe befindet sich noch in einem frühen Stadium.

In großem Umfang werden rezyklierte Baustoffe in Form von hochwertigen Bauteilen derzeit nur vereinzelt bei Gebäuden, meist in Demonstrationsvorhaben, einge-

²

Z. B. im Rahmen des Förderschwerpunkts „Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen“ im Förderbereich „Stoffliche Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen“ des Förderprogramms „Nachwachsende Rohstoffe“ des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über den Projektträger Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR)

setzt. Forschungs- und Entwicklungsprojekte beschäftigen sich mit Fragen der Leistungsfähigkeit, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit (Krauß und Werner 2016). Ansteigende Rohstoffpreise und steigendes Umweltbewusstsein unterstützen den Trend zur Nutzung von Recyclingmaterial im Gebäudebereich.

Textiles Bauen

Im Bereich der konstruktiven Membranen werden grundsätzlich Kompositmaterialien aus Gewebe und Coating eingesetzt. Das Gewebe übernimmt die Übertragung der Kräfte, das Coating schützt die Gewebefasern und sorgt für die Dichtigkeit des Materials. Die in den vergangenen Jahrzehnten bis heute am häufigsten eingesetzten Membrangewebe stellen die PVC-beschichteten Polyestergewebe dar, bei denen es sich um das preisgünstigste Material handelt. Daneben setzt sich PTFE-beschichtetes Glasfasergewebe als umweltverträglicherer Membranbaustoff zunehmend im Hochbau-Anwendungsbereich durch. Darüber hinaus wird derzeit verstärkt an silikonbeschichteten Glasfasergeweben geforscht. Im Bereich der Folien stehen ähnlich den konstruktiven Membrangeweben Fluorpolymer-Kunststoffe und PVC-Kunststoffe zur Verfügung. An die Membranen werden zahlreiche Anforderungen gestellt, die je nach verwendetem Material, gut erfüllt werden können. Das Flächengewicht ist mit 0,1 bis 1,5 kg/m² ausgesprochen gering (zum Vergleich: Fensterglas 5 bis 30 kg/m²), was äußerst leichte Konstruktionen mit großen Spannweiten ermöglicht. Dies bietet u.a. im Hinblick auf eine optimierte gesamtenergetische Bewertung erhebliche Vorteile gegenüber anderen Bauweisen.

Grüne Gebäudehüllen

Die Konzeption „grüner“ Klimafassaden basiert heute im Wesentlichen auf „additiven“ Systemen. Ausgehend vom Bauwerk werden dabei unter Berücksichtigung der Statik und unter Vermeidung von Schadensrisiken an verwendeten Werkstoffen und an der Baukonstruktion Begrünungsoptionen entwickelt. Im Ergebnis bildet das Grün dann entweder eine zusätzliche Schicht direkt am bzw. vor dem Bauwerk oder - unter Einsatz zusätzlicher technischer Hilfsmittel - quasi ein eigenständiges vorgehängtes hinterlüftetes Fassadenelement. Dementsprechend bleibt die aktuelle Forschung im grünen Bereich auch eher auf Leistungen und Wirkungen, die von der Pflanze selbst ausgehen, fokussiert. Erste wissenschaftliche Untersuchungen, die bauphysikalische und vegetationstechnische Belange im Sinne einer energetischen und klimamäßigenden Fassadenoptimierung vereinen, wurden in den letzten Jahren erarbeitet (Brandhorst 2014), müssen aber für eine vollumfängliche Betrachtung ausgeweitet werden.

T5: Multifunktionale Gebäudehülle

Schaltbare Wärmedämmung (SWD)

Die SWD ist bereits seit der Jahrtausendwende weitreichend erforscht und entwickelt. Mehrere Systeme zur Realisierung der Schaltbarkeit befinden sich derzeit in der Entwicklungsphase durch Demonstrationsprojekte, wobei eine Markteinführung mittelfristig zu erwarten ist.

Fassadentemperierung

Aktive Systeme zur Fassadentemperierung sind bereits durch wasserdurchflossene Rohrregister umgesetzt worden. Elektrische, fassadenintegrierte Beheizungsvarianten befinden sich in der Entwicklung.

Wärmespeicher in der Fassade

Unterschiedliche Systeme zu thermischer Speicherung mittels Phasenwechselmaterialien in Fassaden, auch in Verglasungen, werden derzeit demonstriert und sind teilweise am Markt verfügbar. Systeme zur thermischen Aktivierung von Bestandsgebäuden befinden sich ebenfalls in der Demonstrationsphase.

Schaltbare Verglasung

Schaltbare Verglasungen sind seit mehreren Jahren am Markt verfügbar. Adaptive Fassadenelemente mit temperatur- und feuchteabhängiger Morphologie befinden sich in der Laborphase.

BIPV und BIST

Es existieren bereits BIPV Produkte im Bereich Isolierverglasung, indem herkömmliche (poly-, mono-) kristalline Silizium PV-Zellen in 2-Scheiben- und 3-Scheibenverglasung integriert sind. Allerdings ist die Anwendung der Silizium-PV bzw. der nicht-transparenten PV-Technologien im Bereich der Verglasung meist auf Überkopf-Anwendung (Schlagschatten, Sonnenschutz etc.) begrenzt. Diese PV-Technologien werden deshalb auch im Falle einer vertikalen Fassade überwiegend in opake Flächen integriert. Forschungsbedarf besteht in dieser Richtung vor allem in einer kostengünstigeren Produktion der BIPV-Produkte, die aktuell im Preis um ein Vielfaches höher sind als herkömmliche Standard-PV-Module. Die Entwicklung von vor-konfektionierten BIPV Produkten kann hier Abhilfe schaffen. Des Weiteren wächst der Bedarf an Design-Lösungen für BIPV Produkte, um auch eine nachhaltige Akzeptanz in der Baubranche und bei Architekten zu erzielen. Hier können die PV Technologien der 3. Generation (organisch, Farbstoff, Perowskit) eine große Rolle spielen. Während organische sowie Farbstoff-Solarzellen bereits technologisch ausgereift sind und bereits erste Pilotprodukte (integriert in Verglasung) realisiert wurden, stecken die Perowskit-Solarzellen aktuell noch in einer frühen Phase der Entwicklung.

Auch bei der gebäudeintegrierten Solarthermie sind verschiedene, vor allem nicht-deutsche Produkte am Markt vorhanden, die sich in ihrem Aufbau und Integrationsgrad unterscheiden. Am meisten verbreitet sind großformatige, modulare Lösungen mit abgedeckten Flachkollektoren. Die Kollektoren werden hier modifiziert (Absorbergröße, Art und Farbe von Abdeckleisten und Rahmen, etc.) und an die entsprechenden baulichen Gegebenheiten (Wärmedämmverbundsysteme oder vorgehängte, hinterlüftete Konstruktionen) angepasst. Für transparente Fassaden sind nur hochwertige Einzelprodukte, die aktive Wärmezeugung mit Tageslichtversorgung und Sonnenschutzfunktion kombinieren, kommerziell erhältlich. Eine anspruchsvollere architektonische Integration wird insbesondere mit nicht abgedeckten Kollektoren bisher erreicht. Hier werden bestehende Komponenten der Gebäudehülle (z. B. Fassadenverkleidungen) solarthermisch aktiviert. Vor allem dieser Ansatz hat das Po-

tential, durch eine höhere ästhetische Akzeptanz sowie niedrigere Installationskosten eine höhere Marktverbreitung zu erzielen. Hierbei besteht aber noch ein erheblicher F&E-Bedarf für die Konzeption und Erprobung neuer Lösungen in Kombination mit der Baubranche.

FI-HLK

Eine erste Generation dezentraler wandintegrierter HLK-Systeme ist als Produkt erhältlich. Weitere dezentrale sowie auch zentrale fassadenintegrierte HLK-Systeme befinden sich in der Entwicklung, insbesondere bezüglich der Verschaltung mit PCM-Speichern.

Solare Hybridsysteme

Solare Hybridsysteme, bestehend aus einer Verknüpfung zweier Technologien (wie etwa PV und Solarthermie), sind eine weitere Variante aktiver Fassadensysteme. PVT-Kollektoren sind bereits am Markt erhältlich. Allerdings besteht weiterhin Entwicklungsbedarf, um das Zusammenspiel von Photovoltaik und Solarthermie, die an sich je sehr unterschiedliche Betriebsbedingungen fordern, noch zu verbessern. Ziel ist die Entwicklung von Gesamtsystemen, die beide Technologien optimal ausnutzen und einen hohen Gesamtwirkungsgrad aufweisen. Aber auch die Entwicklung innovativer Hybridsysteme mit Hinblick auf sinnvolle Synergie und jeweils optimalen Wirkungsgrad sind erstrebenswert.

Teilkriterium 2.2 Technisches und wirtschaftliches F&E-Risiko

T1: Hochleistungswärmedämmungen

Im Bereich der Hochleistungsdämmstoffe liegt das FuE-Risiko in der Umsetzung einer wirtschaftlichen Syntheseroute, die zwischen Produktkosten, Produktnutzen und Produktimage („ökologisches Produkt“) einen akzeptablen Einklang herstellt. Für neue Materialansätze bilden die erforderlichen Langzeitstabilitäten mögliche Risiken.

T2: Funktionelle optische Oberflächen

Low-e Oberflächen

Bei den low-e Oberflächen liegt das FuE-Risiko in der Entwicklung langzeitstabiler Oberflächen mit geringen Emissionsgraden für den Einsatz im Außenbereich und auf flexiblen Membranen sowie in der Realisierung einer Schaltbarkeit.

Reflektierende und nichtreflektierende optische Oberflächen (cool roofs)

Für reflektierende und nichtreflektierende optische Oberflächen stellt vor allem die Realisierung spektral selektiver Oberflächen ein FuE-Risiko dar.

T3: Transparente/transluzente Elemente

Isolierglas

Risiken im Bereich Hochleistungsverglasung sind sowohl technischer (z. B. Vermeidung von Glasbruch bei dünnen Gläsern, Herstellung dünner Sondergläser, Langzeitstabilität von Folien ohne Beeinträchtigung der optischen Eigenschaften) als auch wirtschaftlicher Art (z. B. hohe Investitionskosten für neue Maschinen und Produktionsanlagen). Eine weitere Erschwernis ist der hohe Preisdruck auf dem Verglasungsmarkt mit nur geringer Akzeptanz neuer teurerer Technologien.

Vakuumverglasung

Gleiches gilt auch für Vakuumisolierglas, bei welchem außerdem die Vermeidung bleihaltiger Lote, sowie Fügeverfahren ohne sichtbaren Evakuierstützen zwei wichtige Entwicklungen für eine Akzeptanz in Europa sind. Aufgrund besserer Dämmwirkung bei geringerer Dicke sind außerdem Neu- und Weiterentwicklungen im Rahmenbereich erforderlich.

Tageslichtsysteme

Im Bereich von Tageslichtsystemen ergeben sich Risiken im Bereich der Nutzerakzeptanz sowie durch die Komplexität bzw. dem Zusammenspiel einzelner Komponenten. Aufgrund der Neuartigkeit vieler Systeme ist die niedrige Marktakzeptanz ein weiteres Risiko.

T4: Ressourcenschonendes Bauen

Nachwachsende und rezyklierbare Baustoffe

Bei der Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen, z. B. im Bereich der Wärmedämmung, ist die Verfügbarkeit nach Markterfordernissen und ökologischen Gesichtspunkten kritisch. Die Verwendung unter Umständen zusätzlich notwendiger Herstellungsverfahren für die Entwicklung industrieller Produkte können diese Produkte zusätzlich verteuern. Bei rezyklierten Baustoffen können zu erreichende Zielkosten, Qualitätsmerkmale und Akzeptanz Risiken darstellen.

Textiles Bauen

Im Bereich des textilen Bauens bestehen technische Risiken sowohl in der Entwicklung von Membrankonstruktionen mit optimierten thermischen und optischen Eigenschaften als auch in der Ausführung von komplexen Membrankonstruktionen. Ein wirtschaftliches Risiko liegt in den aktuell noch hohen Kosten für die fluorpolymerbasierten Membranen und dem notwendigen Konfektionierungsaufwand.

Grüne Gebäudehüllen

Die Nachhaltigkeit und der damit verbundene Pflegeaufwand und damit der wirtschaftliche Betrieb von Bepflanzungssystemen stellt eine Herausforderung dar, insbesondere unter den sich verschärfenden Klimabedingungen in Städten. Die Pflanzensysteme müssen hierzu klimatisch robust sein.

T5: Multifunktionale Gebäudehülle

Die teilweise komplexen synergetischen Effekte bei der Kombination unterschiedlicher funktionaler Komponenten in Fassadenelementen bergen ein FuE-Risiko.

Ein FuE-Risiko zeigt sich bei Elementen der multifunktionalen Gebäudehülle in der Optimierung der energetischen Ausbeute verbauter funktionaler Elemente aufgrund komplexer Synergieeffekte.

Insbesondere für sich in der Entwicklung befindliche Komponenten wie SWD besteht ein wirtschaftliches Risiko, da in der derzeitigen Entwicklungsphase noch relativ hohe Anschaffungskosten einer Marktakzeptanz entgegenstehen.

Tab. 2-3 Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit dem Anwendungsbereich Gebäudehülle und Bau-technik

	sehr gering	gering	eher gering	eher hoch	hoch	sehr hoch
T1: Hochleistungswärmedämmungen						
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
T2: Funktionelle optische Oberflächen						
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
T3: Transparente/transluzente Elemente						
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
T4: Ressourcenschonendes Bauen						
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
T5: Multifunktionale Gebäudehülle						
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Im Bereich der solaraktiven Fassadenkomponenten sind die technischen Risiken v. a. von den eingesetzten einzelnen Technologien abhängig. In der BIPV sind diese z. B. an der verwendeten PV-Technologie angelehnt. Die Umsetzung in ein Produkt dagegen orientiert sich an dem endgültigen Bauelement. Integriert in die Verglasung besteht das technische Risiko der Verarbeitung beider Technologien (Verglasung/PV). Allgemein sind bei der Integration auch die konstruktiven und bauphysikalischen Risiken (Beeinträchtigung vom natürlichen Wärme- und Feuchtetransport, visueller und thermischer Komfort) zu berücksichtigen. Es besteht aber auch ein erhöhter Bedarf an neuen BIPV- und BIST- Lösungen, die gerade die Haptik und Optik des Bau-

teils im Fokus haben um einen weiteren Bereich für eine architektonische sinnvolle und attraktive Lösung zu bieten.

Gleiches gilt für die solarthermischen und die hybriden PV-T Kollektorsysteme. In den hybriden Systemen besteht Entwicklungsbedarf für ein optimiertes Zusammenspiel beider Einzeltechnologien.

Teilkriterium 2.3 Rohstoffrisiken

Es werden kritische Rohstoffe betrachtet, die direkt für die Herstellung und Funktion der betrachteten Technologien notwendig sind.

Ein Rohstoffrisiko besteht beim Einsatz transparent leitfähiger Oxide im Wesentlichen in der Verwendung von hochpreisigen *Indium* zur Herstellung von transparenten Wärmestrahlung reflektierenden Schichten. Indium kann zwar in transparenten low-e Schichten durch alternative Materialien ersetzt werden, jedoch sind die bisher erzielbaren Eigenschaften noch nicht vergleichbar mit denen der Indium-haltigen Schichten.

Bei Isoliergläsern wird überwiegend *Argon* als niedrigwärmeleitendes Füllgas eingesetzt. Es ist ausreichend verfügbar und preiswert. Energetisch wünschenswert wäre der vermehrte Einsatz von schweren Edelgasen, wie Krypton oder Xenon. *Krypton* ist allerdings schwer zu gewinnen und daher sehr teuer. Bei *Xenon* übersteigt die graue Energie verfügbarer Herstellungsverfahren die durch bessere Wärmedämmwirkung eingesparte Heizenergie (Binz 2000).

Im Falle der Entwicklung von hocheffizientem Vakuumisolierglas soll das Schwermetall in Form von bleihaltigem *Glaslot* für den vakuumdichten Randverbund vermieden werden. Als Substitutionsmöglichkeit existiert Vanadium oder alternativ eine Adhäsionsbeschichtung auf Glas in Verbindung mit Metalllot.

Hinsichtlich der im Bereich des textilen Bauens häufig verwendeten *Fluorpolymere* müssen evtl. Gesundheitsrisiken während der Verarbeitung abgeklärt und ggf. entsprechende Sicherheitsvorgaben im Umgang mit diesen Stoffen bei der Konfektionierung gemacht werden.

Im Bereich PV-Technologien und deren Anwendung ist bei den hocheffizienten Perowskitesolarzellen, die derzeit nur im Labormaßstab verfügbar sind, zu erwähnen, dass sie aktuell auf den Einsatz von *Bleisalzen* in der Herstellung angewiesen sind. Substitutionsmöglichkeiten sind Gegenstand aktueller Forschung. Für transparente, leitfähige Schichten in der Photovoltaik wird zumeist auf kostenintensives *Indiumzinnoxid* zurückgegriffen. Als Substitutionsmöglichkeiten stellen sich Graphen, Kohlenstoffnanoröhren, Silbernanodrähte und leitfähige Polymere dar (Ackermann 2016). Bislang bleibt Indiumzinnoxid dennoch das hauptsächlich verwendete Material am Markt.

Im Bereich Solarthermie werden in der Regel keine Materialien mit hohen Risiken verwendet. Für zukünftige solaraktivierte Komponenten der Gebäudehülle kommen vor allem bekannte Stoffe aus der Baubranche (Glas, Stahl und weitere Metalle, Beton, etc.) zum Einsatz.

Zusammenfassung Förderrelevanz

Im betrachteten Anwendungsbereich Gebäudehülle und Bautechnik weisen die Technologien eine große Bandbreite bezüglich des Entwicklungsstandes auf. Nahezu für jede Technologie sind Produkte verfügbar. Jedoch eröffnen neue Forschungs- und Entwicklungsansätze die Chance, vorhandene Potenziale in dem notwendigen Ausmaß zu erschließen. Es ist die Kombination aus geforderter Funktionalität, Wirtschaftlichkeit und Ökologie, welche in Entwicklungen ein hohes Risiko darstellt und zu langen Vorlaufzeiten führt. Deshalb sind in allen beschriebenen Technologien Forschungs- und Entwicklungsbereiche zu identifizieren, die eine Unterstützung der öffentlichen Hand rechtfertigen würde.

2.3 Detaillierte Bewertung des Anwendungsbereiches

2.3.1 Kriterium 3: Marktpotenziale

Teilkriterium 3.1 Globales Marktpotenzial

T1: Hochleistungswärmedämmungen

Der internationale Dämmstoffmarkt hatte 2015 ein Volumen von rund 44 Mrd. US\$. Für den Zeitraum 2016 bis 2024 wird eine jährliche Wachstumsrate (CAGR) von 8,5 % prognostiziert (Grand View Research 2016).

T2: Funktionelle optische Oberflächen

Für funktionelle optische Oberflächen steht grundsätzlich die gesamte Gebäudeoberfläche inklusive Fassade und Dach zur Verfügung.

T3: Transparente/transluzente Elemente

Der globale Fenstermarkt beläuft sich auf etwa 500 Mio. FE (BM 2004). Darüber hinaus sind transluzente Elemente weltweit auch in Dach- und Fassadenflächen einsetzbar.

T4: Ressourcenschonendes Bauen

Der globale Markt für technische Textilien im Baubereich betrug im Jahr 2010 2,591 Mio. Tonnen, was einem Wert von 9,325 Mio. US\$ entsprach. Dabei zeigte sich eine jährliche Wachstumsrate von 4,73 % (Knecht 2006).

T5: Multifunktionale Gebäudehülle

„Laut Prognosen wird der weltweite Markt für GIPV von derzeit etwa 1,6 Milliarden US\$ bis 2016 auf rund 8,7 Mrd. US\$ ansteigen“ (NanoMarkets LC 2009). Für BIST wäre eine jährliche thermische Energiebereitstellung von 1800 bis 2700 TWh erreichbar. Angenommen werden hier ein globales Marktpotenzial für die gesamte ST-Branche von ca. 9000 TWh im Jahr 2050 (siehe *Technologiebericht 1.4: Solare Wärme und Kälte*) und ein Anteil von 20 - 30 % an der gesamten Wärmeproduktion für die gebäudeintegrierten Kollektoren.

Teilkriterium 3.2 Nationales Marktpotenzial

T1: Hochleistungswärmedämmungen

Das jährliche Marktvolumen wird aufgrund der sich verschärfenden Energieeffizienzanforderungen mittelfristig steigen. So soll das jährliche Marktvolumen für Deutschland auf rund 2,3 Mrd. Euro für das Jahr 2020 ansteigen. 2010 hatte der Markt ein Volumen von rund 1,8 Mrd. Euro, was einer jährlichen Wachstumsrate (CAGR) von 2,5 % für diesen Zeitraum entspricht (Vollrath 2014).

T2: Funktionelle optische Oberflächen

Für funktionelle optische Oberflächen steht grundsätzlich die gesamte Gebäudeoberfläche inklusive Fassade und Dach zur Verfügung. Nach Kaltschmitt et al. (2006) sowie VFF und BF (2014) beläuft sich die Gesamtoberfläche (Fassade, Dach und Fenster) der Wohn- und Nichtwohngebäude Deutschlands auf einen Wert von etwa 10.000 Mio. m². Das derzeitige Volumen des Bereich Bautextilien wird mit etwa 1 Mrd. € beziffert, wobei Experten Zuwachsraten von 15- 20 % erwarten (futureTEX 2016).

T3: Transparente/transluzente Elemente

Der Fensterbestand in Deutschland betrug 2013 nach VFF und BF (2014) 595 Mio. Fenstereinheiten (FE). Davon weisen 289 Mio. FE U_w-Werte von 2,4 W/(m²K) und schlechter auf. Eine Sanierung allein dieser Fenster würde 65 Mrd. kWh Heizwärme und 16 Mio. t CO₂ pro Jahr einsparen. In Deutschland wurden 2013 rund 13 Mio. FE produziert. Seit 2007 steigen die Zahlen produzierter Fenster in Deutschland kontinuierlich um im Mittel rund 2 % pro Jahr.

Da ein Großteil der Fensterflächen auch mit Sonnen- und Blendschutzsystemen ausgerüstet werden kann, liegt die verfügbare Fläche hier in einer ähnlichen Größenordnung. Hinzu kommen Gänge, Treppenhäuser, Wände und Decken, die mit Tageslichtlenksystemen oder transluzenten Systemen ausgestattet werden können.

T4: Ressourcenschonendes Bauen

Derzeit beträgt der Anteil von Bautextilien am Marktvolumen technischer Textilien in Deutschland ca. 10 %, das entspricht einem finanziellen Volumen von ca. 1 Mrd. €. Dabei werden jährliche Zuwachsraten von 15 % bis 20 % erwartet (Zirnzak 2011).

T5: Multifunktionale Gebäudehülle

Für multifunktionale Fassadenelemente eignen sich generell alle Fassadenflächen. Nach Kaltschmitt et al. (2006) beläuft sich die Fassadenfläche der Wohn- und Nichtwohngebäude in Deutschland auf einen Wert von 5350 Mio. m². Für die solare Energieerzeugung nutzbare Flächen stehen hier etwa 3000 km² zur Verfügung. Dies entspricht in etwa einer installierbaren PV-Leistung von 300 GW (FG Bauwerkintegrierte Photovoltaik 2012), damit einer jährlich verfügbaren elektrischen Energie von etwa 300 TWh und einer Einsparung von 150 Mio. t CO₂ pro Jahr. Bei einer realistischeren Annahme einer Fassadenbedeckung von etwa 10 - 20 % mit BIPV ergibt sich damit eine elektrische Energiebereitstellung von 30 - 60 TWh und

einer damit verbundenen Einsparung von 15 - 30 Mio. t CO₂ pro Jahr. Für BIST wird eine jährliche thermische Energiebereitstellung von ca. 20 - 30 TWh und eine Einsparung von 5 - 7 Mio. t CO₂-Emissionen geschätzt. Diese Berechnung erfolgt unter den Annahmen eines Marktpotenzials für die gesamte ST-Branche von ca. 100 TWh im Jahr 2050 (siehe *Technologiebericht 1.4: Solare Wärme und Kälte*) und einem Anteil von 20 - 30 % an der gesamten Wärmeproduktion für die gebäudeintegrierten Kollektoren.

2.3.2 Kriterien 3-9 integrale Betrachtung

Die Kriterien 3-9 werden für das Technologiefeld Energieeffiziente Gebäude und Gebäudetechnik integral betrachtet und sind unter Kapitel 6 dargestellt.

2.3.3 Kriterium 10: Unternehmerisch-technische Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit

In dem Vorgängerbericht wird richtig festgestellt, dass die Entwicklung von Effizienztechnologien für den Gebäudebereich weitgehend unabhängig von äußeren Einflüssen ist. Die Marktnachfrage jedoch reagiert sensibel auf steigende Energiepreise. Unterstützt wird die Nachfrage durch Anreizsysteme und rechtliche Vorgaben.

Die schnelle Umsetzung von Innovationen im Gebäudebereich und die weitreichende Durchdringung des Marktes wird durch verschiedene Hemmnisse verzögert. Als Hemmnisse können oftmals langwierige Prüfverfahren und lange Standzeiten von Bauprodukten genannt werden. Gleichzeitig erfordert die Dissemination von neuem Wissen durch Demonstrations- und Monitoringprojekte, der Eingang in die Lehre sowie die Ausbildung der Architekten und Planer Zeit.

In Bezug auf die Umsetzung von Bauvorhaben führen höhere Anforderungen und Komplexität in Verbindung mit verbesserten Planungstools zu im Wesentlichen konstanten Zeiten. Dies gilt insbesondere für komplexe Großbauten. Im Wohnungsbau werden durch Vorfertigung und Modulbauweise Kosten- und Zeitvorteile zu erwarten sein. Eine Verkürzung der Nutzungsdauer von Gebäuden wird aufgrund von Nachhaltigkeitsaspekten, die zunehmend vermehrt berücksichtigt werden, nicht zu erwarten sein. Allerdings wird zukünftig eine höhere Flexibilität hinsichtlich der Umnutzung von Gebäuden gefordert werden.

In Tab. 2-4 sind die Indikatoren Planungszeit, Bauzeit und Nutzungsdauer des Anwendungsbereichs für den Wohnungsneubau dargestellt. Die Heterogenität der Sanierungsmaßnahmen im Gebäudebestand und des Einsatzes im Neubau lässt eine sinnvolle Abschätzung der spezifischen Investition und fixen Kosten an spezifischer Investition nicht zu.

Tab. 2-4 Indikatoren zur Bewertung der Pfadabhängigkeit und Reaktionszeit des Anwendungsbereiches Gebäudehülle und Bautechnik

Variable	Einheit	Heute	2020	2030	2040	2050
Planungszeit	Monate	6	5	5	5	5
Bauzeit	Monate	12	10	10	8	8
Heute übliche ökonomische Nutzungsdauer	Jahre	50	50	50	50	50

2.3.4 Kriterium 11: Abhängigkeit von Infrastrukturen

Die Technologien des Anwendungsbereiches Gebäudehülle und Bautechnik hängen im Wesentlichen von bestehenden Verkehrsinfrastrukturen ab, die bereits ausreichend vorhanden sind. Da alle Technologien auf ein Mindestmaß an Verkehrsinfrastrukturen angewiesen sind, stellt diese kein wesentliches Unterscheidungsmerkmal dar. Lediglich die Technologie BIPV unter dem Punkt Multifunktionale Gebäudehülle setzt im Einspeisefall ein entsprechend ausgebautes Stromnetz voraus.

Tab. 2-5 Abhängigkeit des Anwendungsbereiches Gebäudehülle und Bautechnik von Infrastrukturen

	Ja	Nein
Die Nutzung der Technologie(n) ist <i>unabhängig</i> von Infrastrukturen möglich.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Nutzung und Verbreitung der Technologie(n) ist von <i>bestehenden</i> Infrastrukturen abhängig.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Zur Verbreitung und Nutzung der Technologie(n) müssen <i>bestehende</i> Infrastrukturen ausgebaut werden.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Zur Verbreitung und Nutzung der Technologie(n) müssen <i>neue</i> Infrastrukturen gebaut werden.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

2.3.5 Kriterium 12: Systemkompatibilität

Der Anwendungsbereich Gebäudehülle und Bautechnik ist grundsätzlich als kompatibel zu bestehenden Systemen anzusehen.

Für die Technologien des Anwendungsbereiches Gebäudehülle und Bautechnik sind sowohl im Einzelfall als auch bei großer Durchdringung keine Rückwirkungen auf andere Systeme zu erwarten. Das heißt die Systeme können parallel eingesetzt werden bzw. sind austauschbar.

Die Ausnahme stellt die Gebäudeintegrierte Photovoltaik unter dem Punkt multifunktionale Gebäudehülle dar. In diesem Fall sind Rückwirkungen auf das Stromnetz zu erwarten. Da dieser Punkt bereits ausführlich im *Technologiebericht 1.3: Photovoltaik* ausgeführt wurde, wird er an dieser Stelle nicht wiederholt.

Für die Technologien sind demzufolge der Aufwand zur Herstellung der Systemkompatibilität und die Wechselwirkungen mit anderen Systemen in allen Anwendungsfällen vernachlässigbar.

3 Anwendungsbereich Gebäudesystemtechnik

3.1 Beschreibung

Die Gebäudesystemtechnik dient zur bedarfsgerechten Versorgung des Gebäudes und seiner Räume mit Energie (Wärme, Strom, Licht) und Medien (z. B. Frischluft) und hat das Ziel entsprechende Komfortbedingungen für den Nutzer zu schaffen. In Zukunft wird diese auch in übergeordnete Energie- und Informationssysteme, wie einem Smart Grid, einzubinden sein. Kernelemente der Gebäudesystemtechnik stellen somit Heizungs-, Klimatisierungs- und Lüftungssysteme, Stromerzeugungsanlagen (z. B. Photovoltaik-Anlagen), Beleuchtungseinrichtungen und die Gebäudeautomation dar. Strom- und Wärmespeicher sind ebenso wichtige Bestandteile der Gebäudesystemtechnik, die zur Anpassung des Energieangebots und -bedarfs dienen, die notwendige Netzdienlichkeit der Gebäude ermöglichen und sind entsprechenden Gebäudetechniken (z. B. Heizung, PV-Anlage) zugeordnet.

In vielen Altbauten bezieht sich der Begriff Gebäudesystemtechnik oftmals nur auf das Heizungs- und Beleuchtungssystem. Deren Steuerung und Regelung ist zudem auf das notwendige Minimum beschränkt. In modernen Gebäuden können dagegen eine Vielzahl von Gebäudesystemen über eine komplexe Gebäudeautomation vernetzt sein um einen energieeffizienten, nutzungsangepassten und komfortablen Betrieb zu gewährleisten. Dabei können sich solche Systeme externer (Wetterlage, Wettervorhersage) und interner Informationen (beispielsweise vorherrschende Temperaturen, aktuelle oder geplante Anwesenheit, Lastprofile) bedienen. Neben diesen direkten energierelevanten Aspekten dient der verstärkte Einsatz von Gebäudesystemtechnik unter dem Begriff Smart Home der Erhöhung der Sicherheit (z. B. Einbruchschutz) und des Nutzerkomforts (z. B. Heimlogistik, Kommunikation).

Der Bedarf an Gebäudesystemtechnik wird in Zukunft ansteigen. Gründe sind hierfür der Ausbau der Erneuerbaren Energie und gesetzlichen Vorgaben, höhere Komfortansprüche und der demographische Wandel in Deutschland (Neitzel et al. 2015). Gleichzeitig werden durch den Ausbau der Erneuerbaren Energien im Gebäudebereich neue Heizungssysteme (Low-Ex-Systeme, wie z. B. Mikro-KWK) für eine größere Selbstversorgung Einzug finden. Auch SolarAktivHäuser erfordern eine angepasste Gebäudesystemtechnik, so dass deren Energiebedarf für Heizung und Warmwasser im Mittel ganzjährig durch Sonnenenergie gedeckt werden kann.

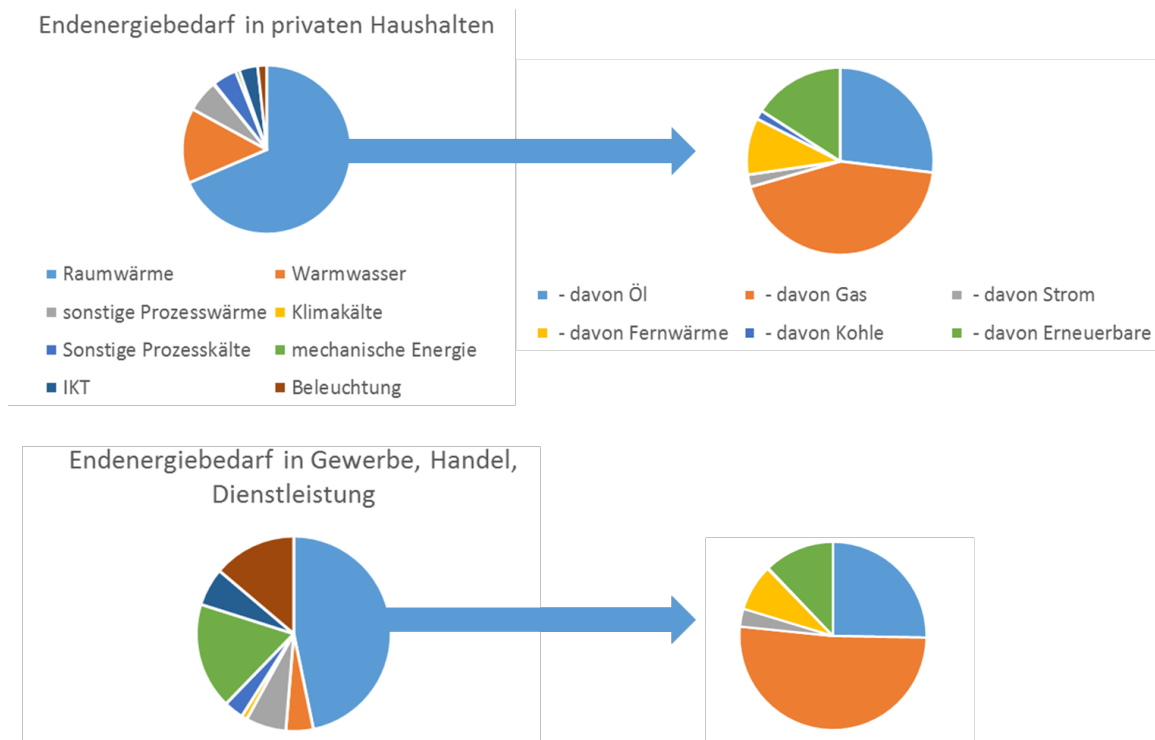


Abb. 3-1 Prozentuale Aufteilung des Endenergiebedarfs für die Sektoren private Haushalte und Gewerbe, Handel, Dienstleistung im Jahr 2015

Quelle: BMWi (2017)

Beschreibung T6 Gebäudeautomation

Dieses Themenfeld umfasst die Technologien, die der Gebäudeautomation zuzuschreiben sind. Dies beinhaltet kleine Insellösungen aus dem sog. Smart Home Bereich bis hin zu großen, mehrere Immobilien umfassenden Installationen mit Managementebene, Automationsebene und Feldebene.

Neue Technologien und Ansätze, die die Funktion einer klassischen Gebäudeautomation ergänzen sind Smart Grid Interaktionen (Netzdienlichkeit von Gebäuden), präemptive Automation (unter Berücksichtigung von Wetter-/Nutzungs- und Lastprognosen) sowie themenübergreifende Systemintegration. Auch „Smart-Metering“ fällt in diesen Anwendungsbereich. Insbesondere im Hinblick auf den weiteren Ausbau der Energieversorgung mit erneuerbaren Energieträgern ist die Gebäudeautomation mit Smart Grid Funktionalität ein unverzichtbarer Baustein der Energieversorgung.

Die Gebäudeautomation erfüllt weiterhin in zunehmendem Maße die Funktion des Monitorings und des Energiemanagements, also dem Erfassen aller aktueller Verbrauchsdaten und der zeitnahen Reaktion darauf (z. B. Lastverteilung, Lastabwurf). Es besteht hier eine Verzahnung mit der Technologie T14 (Nutzer-Gebäude Beziehung und Schnittstellen).

Beschreibung T7 Wärmespeicher

Wärmespeicherung ist überall dort notwendig, wo Bedarf und Angebot zeitlich auseinanderliegen oder wo die Nachfrageleistung die Anschlussleistung übersteigt. Systeme gibt es auf der Basis

- der Speicherung sensibler Wärme. D. h. hier werden Temperaturänderungen genutzt, um die innere Energie zu erhöhen;
- der Speicherung von latenter Wärme durch die Änderung der Enthalpie durch Zustandsänderungen (z. B. flüssig – fest) sowie durch
- chemische Speicherung.

Die Speichereinheiten in Gebäuden bewegen sich typischerweise zwischen kleinen Warmwasserspeichern (60 l Boiler für Dusche/Bad in kleinen Wohnungen) bis hin zu 1.000 bis 1.500 l für Einfamilienhäuser mit größeren thermischen Solaranlagen und/oder Holzheizungen. In wenigen Einzelfällen können diese Werte auch deutlich überschritten werden (Mehrfamilienhäuser mit großen Solaranlagen). Durch geeignete Aktivierungsmaßnahmen kann auch die Gebäudestruktur selbst als thermischer Speicher dienen.

In den letzten 10-15 Jahren lag der Fokus auf der Entwicklung von Hochtemperaturspeichern für industrielle Anwendungen. Im Gebäudebereich waren nur geringe Forschungsaktivitäten zu verzeichnen. Das Augenmerk lag auf der Integration von PCM (Phase-Change-Materials) in Speichern und Baumaterialien.

Durch den starken Ausbau volatiler regenerativer Stromerzeugung (Wind, PV, Biomasse), der auch in Zukunft weiter anhalten wird, kommt der Speicherung von elektrisch erzeugter Wärme eine wichtige Rolle zu.

Diese Technologie wird darüber hinaus im *Technologiebericht 3.3b: Energiespeicher (thermisch, thermo-chemisch und mechanisch)* detailliert betrachtet.

Beschreibung T8 Stromspeicher

Das Thema Stromspeicher wird im *Technologiebericht 3.3a: Energiespeicher (elektrisch und elektro-chemisch)* ausführlich diskutiert. An dieser Stelle wird daher kurz die Bedeutung beim Einsatz in Gebäuden beschrieben.

In Gebäuden kommen Stromspeicher insbesondere zum Einsatz, um durch Photovoltaiksysteme gewonnene überschüssige Energie zu speichern und im Bedarfsfall (beispielsweise nachts) wieder abzugeben. Dabei sind elektrische Speicher prädestiniert, da im Vergleich zu anderen Speicherarten nur geringe Wirkungsgradverluste auftreten. Der Einsatz eines geeigneten elektrischen Speichers erhöht deutlich den Eigenbedarfsanteil des Photovoltaikstromes und somit einerseits den Autarkiegrad des Endverbrauchers und reduziert andererseits die Einspeisung von Leistungsspitzen um die Mittagszeit, was den Netzbetreibern zugutekommt und die zukünftig erforderliche Netzdienlichkeit von Gebäuden sicherstellt (Quurck 2014).

Elektrische Speicher im Gebäude müssen mehrere Anforderungen erfüllen: Sie müssen eine ausreichend hohe Energiedichte aufweisen, um die abends und nachts benötigte Energiemenge bei moderatem Raumbedarf speichern zu können. Zudem muss die Leistungsdichte hoch sein, da viele Anwendungen im Haushalt sehr schnell viel

Energie benötigen, die der Speicher dann kurzfristig zur Verfügung stellen muss. Des Weiteren sollte die langfristige Zyklenstabilität gewährleistet sein, damit der Speicher trotz der täglichen Lade- und Entladevorgänge eine lange Lebensdauer hat.

Momentan werden für Privathaushalte v.a. Lithium-Ionen und Blei-Säure-Batterien eingesetzt (letztere müssen aufgrund ihrer geringen Zyklenstabilität von Zeit zu Zeit ausgetauscht werden). Eine weitere technologische Entwicklung ist die Nutzung von E-Mobilen als Stromspeicher für Gebäude. Hier besteht eine Kopplung mit der Technologie T6 Gebäudeautomation. Für große Leistungsentnahmen bietet sich die Kombination aus einer Batterie und einem Kurzzeitspeicher mit hoher Leistungsdichte, beispielsweise einem Doppelschichtkondensator, an.

Beschreibung T9 HLK-Systeme (Low-Ex)

Heiz-/Kühlsysteme und Wärmepumpen

Der Begriff Low-Ex-Systeme bezeichnet üblicherweise gebäudetechnische Systeme, die mit geringen Temperaturdifferenzen arbeiten. Hierdurch ist die Nutzung von Umweltenergie oder Niedertemperaturwärme und –kälte exergetisch sehr effizient möglich. Für die Gebäudeheizung/-kühlung werden dabei in der Regel passive Lüftungskonzepte wie Nachtlüftung oder zentrale Lüftungssysteme mit Erdschichtwärmehaushalt sowie aktive Flächenheiz-/kühlsysteme wie Heiz-/Kühldecken oder Bauteilaktivierung verwendet. Diese kommen aufgrund ihres hohen Strahlungsanteils mit im Kühlfall hohen Vorlauftemperaturen (ca. 16 °C) bzw. im Heizfall geringen Vorlauftemperaturen (ca. 35 °C) aus. Als Energie-, d. h. Wärme- und Kältequellen, dienen neben der Außenluft auch Solarthermie (vgl. *Technologiebericht 1.4: Solare Wärme und Kälte*), das Erdreich, Grundwasser oder Eisspeicher, häufig in Kombination mit Wärme-/Kältepumpen. Zusätzlich werden oft noch Speicher in das System eingebunden um Wärme-/Kältebedarf und –bereitstellung zeitlich entkoppeln zu können.

Wärmepumpen werden im *Technologiebericht 1.7: Umweltwärme* separat behandelt.

Mikro-KWK

Unter dem Begriff Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) versteht man Systeme, die sowohl Wärme als auch Strom erzeugen können. Im Vergleich zur Stromerzeugung ohne Wärmeauskopplung können damit deutlich höhere Gesamtwirkungsgrade von bis zu 90 % erreicht werden (Schubert et al. 2014). Typische Primärenergieeinsparungen liegen bereits heute im Bereich von 15 – 25 % im Vergleich zur getrennten Erzeugung von Wärme und Strom (Bachor A., Binde W. et al. 2013). Der Begriff Mikro-KWK beschreibt hier kleine dezentrale Anlagen mit Leistungsbereichen von 1 - 50 kW_{el} (in der Literatur oft unterteilt in Nano-/Mikro-/Mini-KWK). Je nach Leistungsbereich werden die Anlagen für Ein- oder Mehrfamilienhäuser bis hin zu größeren Immobilien und kleinen Nahwärmenetzen eingesetzt. Allen gemein ist die dezentrale Form der Strom- und Wärmerzeugung, die einen wichtigen Baustein der Energiewende darstellt, aber zugleich in Konkurrenz zu anderen technischen Lösungen wie z. B. zentraler Fernwärme oder Solarthermie, sowie zur Energieeinsparung durch Gebäudeenergieeffizienzmaßnahmen steht, die durch die deutliche Reduktion der Wärme-

energienachfrage die Wirtschaftlichkeit von Mikro-KWK Anlagen in Frage stellen können.

Beschreibung T10 Kunstlicht (LED, OLED)

Die Beleuchtung nimmt etwa 19 % des weltweiten Strombedarfs ein (Photonics21 2010). Es ist dabei zu erwarten, dass sich der Bedarf an Beleuchtung aufgrund der menschlichen Aktivitäten, die sich immer weniger an das Tageslicht anpassen, zwischen 2010 und 2050 verdreifachen wird. Großer Vorteil der Festkörperbeleuchtung, wie LED und OLED, ist die Möglichkeit natürliches Licht, sogenanntes biodynamisches Tageslicht, nachzuahmen und somit einen entscheidenden Beitrag für die Gesundheit und das Wohlbefinden des Menschen zu leisten, trotz Arbeiten unter künstlicher Beleuchtung (HTSM 2013).

3.2 Relevanz öffentlicher Förderung

3.2.1 Kriterium 1: Vorlaufzeiten

Der Anwendungsbereich Gebäudesystemtechnik ist sehr heterogen. Dadurch ergeben sich für die unterschiedlichen Technologien verschiedene Vorlaufzeiten.

T6 Gebäudeautomation

Da die Technologie der Gebäudeautomation Entwicklungen von sehr unterschiedlichem TRL beinhaltet, deckt die Vorlaufzeit bis zur Marktreife einer Entwicklung ebenfalls ein breites Spektrum ab. Dieses reicht von 1 bis ca. 10 Jahren. Erheblichen Einfluss auf die Vorlaufzeit hat die Tatsache, dass z. B. zur Vereinheitlichung von Schnittstellen große Industriekonsortien sich auf einen Standard einigen müssen. Beispielsweise vergingen bei der Spezifikation des KNX-Bus 6 Jahre, bis zur internationalen Norm weitere 4 Jahre.

Weiterhin sind bei neuen Entwicklungen oft Referenzobjekte mit idealerweise über mehrere Jahre hinweg funktionierenden Installationen erforderlich.

T7 Wärmespeicher

Diese Technologie beinhaltet ebenfalls Entwicklungen von sehr unterschiedlichem TRL. So ist im Bereich sensibler Speicher mit kurzen Entwicklungszyklen zu rechnen (z. B. verbesserte Dämmung oder Schichtung). Speicher mit PCM haben je nach eingesetztem Material längere Vorlaufzeiten von 2 - 10 Jahren, während chemische Speicher eher längere Vorlaufzeiten haben können. Die Vorlaufzeit wird u. a. von zeitaufwendigen Tests auf Zyklenstabilität beeinflusst.

T9 HLK-Systeme (Low-Ex)

Aufgrund des extrem breit gefächerten Anwendungsbereiches kann nur eine größere Zeitspanne für die Vorlaufzeiten angegeben werden. Je nach Einzeltechnologie können die Vorlaufzeiten hier von wenigen bis zu 20 Jahren und mehr reichen. Dies gilt auch für die Angaben zum Entwicklungsstadium das neben bereits marktreifen Einzelkomponenten auch Komponenten umfasst, die sich noch in einem sehr frühen Stadium befinden.

T10 Kunstlicht (LED, OLED)

LEDs sind in ihrer Entwicklung bereits weit vorangeschritten. Aktuell ersetzen sie bereits die Glühlampen, die seit Ende 2012 in der EU, sowie Halogenlampen und Lampen mit einer schlechteren Energieeffizienzklasse als „B“, die seit Ende 2016 verboten worden sind. Die Integration von LEDs in intelligente Beleuchtungssysteme steckt noch in ihren Anfängen.

Organische Leuchtdioden benötigen eine längere Vorlaufzeit bis 2030 für eine großflächige Markteinführung.

Tab. 3-1 Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung von Technologien im Anwendungsreich Gebäudesystemtechnik

Abhängig von den verschiedenen Szenarienentwicklungen und öffentlicher Förderung ist mit der ersten kommerziellen Anwendung der weiterentwickelten Technologie in Deutschland zu rechnen:

T6 Gebäudeautomation

Szenarienbereich DE_80 % bis 2020 ☐ bis 2030 ☒ bis 2040 ☐ bis 2050 ☐ nach 2050 ☐

Szenarienbereich DE_95 % bis 2020 ☐ bis 2030 ☒ bis 2040 ☐ bis 2050 ☐ nach 2050 ☐

T7 Wärmespeicher

Szenarienbereich DE_80 % bis 2020 ☐ bis 2030 ☒ bis 2040 ☐ bis 2050 ☐ nach 2050 ☐

Szenarienbereich DE_95 % bis 2020 ☐ bis 2030 ☒ bis 2040 ☐ bis 2050 ☐ nach 2050 ☐

T9 HLK-Systeme (Low-Ex)

Szenarienbereich DE_80 % bis 2020 ☐ bis 2030 ☐ bis 2040 ☒ bis 2050 ☐ nach 2050 ☐

Szenarienbereich DE_95 % bis 2020 ☐ bis 2030 ☐ bis 2040 ☒ bis 2050 ☐ nach 2050 ☐

T10 Kunstlicht (LED, OLED)

Szenarienbereich DE_80 % bis 2020 ☐ bis 2030 ☒ bis 2040 ☐ bis 2050 ☐ nach 2050 ☐

Szenarienbereich DE_95 % bis 2020 ☐ bis 2030 ☒ bis 2040 ☐ bis 2050 ☐ nach 2050 ☐

3.2.2 Kriterium 2: Forschungs- und Entwicklungsrisiken (technisch, wirtschaftlich, rohstoffseitig)

Teilkriterium 2.1 Entwicklungsstadium des Anwendungsbereiches Gebäudesystemtechnik

Der Anwendungsbereich Gebäudesystemtechnik ist heterogen, so dass sich keine einheitliche Aussage zum Entwicklungsstadium einzelner Technologien treffen lässt und hier vielmehr eine Bandbreite anzugeben ist. In Tab. 3-2 sind die aktuellen Entwicklungsstadien der betrachteten Technologien aufgeführt.

Tab. 3-2 Aktuelles Entwicklungsstadium des Anwendungsbereiches Gebäudesystemtechnik

Grobklassifizierung	Feinklassifizierung	T6	T7	T8	T9	T10
Grundlagenforschung						
	TRL 1 – Grundlegende Prinzipien beobachtet und beschrieben, potentielle Anwendungen denkbar	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Technologieentwicklung						
	TRL 2 – Beschreibung eines Technologiekonzepts und/oder einer Anwendung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 3 – Grundsätzlicher Funktionsnachweis einzelner Elemente einer Anwendung/Technologie	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 4 – Grundsätzlicher Funktionsnachweis Technologie/Anwendung im Labor	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Demonstration						
	TRL 5 – Funktionsnachweis in anwendungsrelevanter Umgebung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	TRL 6 – Verifikation mittels Demonstrator in anwendungsrelevanter Umgebung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	TRL 7 – Prototypentest in Betriebsumgebung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	TRL 8 – Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit in Betriebsumgebung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Kommerzialisierung						
	TRL 9 – Erfolgreicher kommerzieller Systemeinsatz	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

TRL= Technology Readiness Level

T6 Gebäudeautomation, T7 Wärmespeicher, T8 Stromspeicher, T9 HLK-Systeme (Low-Ex), T10 Kunstlicht (LED, OLED)

T6 Gebäudeautomation

Aktuell sind im Smart Home Bereich erste Gebäudeautomationslösungen für den Privatbereich erhältlich. Dabei handelt es sich um proprietäre Lösungen, die den Anwender i. d. R. an einen bestimmten Hersteller binden. Grundfunktionen zur Energieeffizienz wie die raumweise Steuerung von Licht und Heizung sind bereits verfügbar. Erste funkvernetzte Systeme sind marktverfügbar.

Seit 2012 fördert das BMWi das „Zertifizierungsprogramm Smart Home + Building“ (Klebsch 2017). Hierbei sollen gemeinsame Standards geschaffen und Interoperabilität geprüft und zertifiziert werden. Hier besteht nach wie vor ein erheblicher Entwicklungsbedarf. Durch das Etablieren von herstellerunabhängigen Lösungen kann das Marktwachstum auch mittels Nachrüstung beschleunigt werden.

Im Fraunhofer-inHaus-Zentrum werden seit 2001 Gebäudeautomationstechnologien unter Praxisbedingungen getestet.

Zukünftiger Entwicklungsbedarf besteht in der Verbesserung der systemübergreifenden Gebäudeautomation (mehrere Technologien im Verbund). Ebenfalls besteht noch hoher Entwicklungsbedarf bei der Netzdienlichkeit von Gebäuden. Dieser wird durch den fortschreitenden Übergang von fossilen zu regenerativen und somit meist volatilen Energiequellen bei der Stromproduktion notwendig. Dabei stellt die Gebäudeautomation die Schlüsseltechnologie für die Sektorkopplung im Gebäudebereich dar. Eine weitere technologische Entwicklung ist die Nutzung von E-Mobilen als Stromspeicher für Gebäude. Hier besteht eine Kopplung mit der Technologie T8 Stromspeicher.

Eng verknüpft damit ist die Entwicklung von Technologien zur Netzdienlichkeit von Quartieren. Hier wird sich zukünftig erheblicher Entwicklungsbedarf ergeben.

Im Bereich der Gebäudeautomation im Nichtwohnbereich besteht ebenfalls noch großer FuE-Bedarf. Klassische Steuerungs- und Regelungsaufgaben werden von den marktverfügbaren Systemen beherrscht. Neue Technologien und Ansätze wie präemptive Automation (unter Berücksichtigung von Wetter-/Nutzungs- und Lastprognosen), selbstlernende Systeme sowie themenübergreifende Systemintegration werden derzeit in ersten Pilotprojekten untersucht und haben ein großes Entwicklungspotential.

FuE Bedarf besteht ebenfalls bzgl. der Fragestellung, wie hoch der Energiebedarf durch die Gebäudeautomationskomponenten selbst ist und ob ggf. schlimmstenfalls eine Überkompensation der im Gebäude erzielten Einsparungen erfolgt.

Ergänzend ist im Bereich Monitoring noch ein erheblicher FuE-Bedarf. Derzeit werden durch Gebäudeautomationssysteme zwar Daten erfasst. Das intelligente und automatisierte Auswerten der erfassten Daten sowie die Betriebsoptimierung und das Ableiten neuer Regelstrategien bietet erhebliches Energie-Einsparpotential, unterbleibt aber bisher oft.

T7 Wärmespeicher

Im Gebäudebereich werden hauptsächlich drucklose, gut wärmegeämmte Stahlspeicher mit Wasser als Speichermedium eingesetzt. In geringem Maße werden auch PCM-Füllungen verwendet. Die Speicherdichten liegen zwischen 1,1 kWh/(m³K) (Wasser) und 40 kWh/m³ (Paraffine) bis 100 kWh/m³ (Salzhydrate u. a.). Die Wärmedämmung von Wärmespeichern erfolgt normalerweise mit konventionellen Dämmstoffen mit Wärmeleitfähigkeiten zwischen typischerweise 0,025 W/(mK) (PU-Schäume) und 0,035 W/(mK) (Mineral- oder Glasfasern) und ist ca. 10 cm dick.

Auf Grund des teilweise stark fluktuierenden Stromangebotes und des nicht gleichmäßigen Bedarfs (z. B. erhöhter Wind- und/oder Solarstromdargebot an Wochenenden) werden Speichertechniken sehr wichtig (Henning 2014). Da Stromspeicher sehr teuer sind, sollten Wärmespeicher dort eingesetzt werden, wo sie nutzbringend sind. Dies ist vor allem im Niedertemperaturbereich (Heizung, Warmwasser) in Gebäuden der Fall.

Um Regelenergie im Kurz- und Mittelzeitsektor einzusparen, werden größere hochgedämmte (z. B. mit Vakuumtechnik ausgestattete) Speicher mit intelligenten Lade- und Entladesystemen sowie ausgeklügelten Steuereinheiten benötigt.

Derzeit wird Regelenenergie in Primär-, Sekundär- bzw. Minutenreserveleistung unterteilt, welche sich im Wesentlichen in der Reaktionszeit des Abrufes des jeweiligen Produktes unterscheiden. Dementsprechend müssen die energietechnischen Anlagen ausgelegt werden, um die elektrische Leistung in der erforderlichen Zeit in Wärme umzusetzen (negative Regelenenergie) bzw. elektrische Energie (positive Regelenenergie) an die elektrischen Netze zu liefern. In Frage kommen z. B. elektrische Durchlauferhitzer als direkte Strom-Wärme-Wandler bzw. Wärmepumpen für die negative Regelenenergie sowie PV- oder KWK-Anlagen für die positive Regelenenergie.

Grundsätzlich sind sämtliche wärmeproduzierenden elektrischen Haushaltsgeräte potentielle Kandidaten für die Regelenenergie (z. B. Kühlschränke, Gefrierschränke, Kaffeemaschinen etc.).

Damit der Komfort der Gebäudenutzer nicht eingeschränkt wird, werden die in den genannten energietechnischen Anlagen vorhandenen Speicherkapazitäten genutzt oder zusätzliche Kapazitäten installiert, um die Nutzung der Geräte zeitlich von den Stromnetzschwankungen zu entkoppeln. Eine Erhöhung der jeweiligen Speicherkapazitäten und damit der Ein- bzw. Ausspeicherleistungen, z. B. durch Integration von PCM, bringt auf der anderen Seite Vorteile für die Netzstabilisierung.

Auch die Ankopplung der Gebäudemassen (Estrich, Innen- und Außenwände und vor allem Betondecken) kann eine wichtige Rolle übernehmen, da diese immer vorhanden sind. Hier liegt die Herausforderung in der Entwicklung einfacher Be- und Entladeeinrichtungen und deren Steuerung, ohne dass die Raumtemperaturen zu sehr schwanken und das Komfortband verlassen.

Neben der Wärmespeicherung, aber auch wie oben aufgeführt für die Kältespeicherung (Kühlgeräte) wird die Wärmedämmung eine wichtige Rolle auf dem Weg zu mehr Energieeffizienz spielen. Hier können die Wärmeverluste durch Hochleistungswärmedämmungen reduziert und die Speicherkapazität bei vorgegebenem Installationsvolumen durch schlanke Wärmedämmung maximiert werden.

Wird die Stromerzeugung zukünftig durch Brennstoffzellen z. T. in Gebäude verlegt, ist die Abwärmenutzung wichtig, um hohe Wirkungsgrade zu erzielen.

T8 Stromspeicher

Der Bereich Stromspeicher fokussiert sich auf zwei technologische Schwerpunkte: Speicher mit konventioneller Akkumulatoren-Technologie sind bereits marktverfügbar. Derzeit liegt hier der Forschungsschwerpunkt auf den zugrundeliegenden elektrochemischen Prozessen. Ziel sind erhebliche Steigerungen im Bereich der Speicherdichte und der Zyklenstabilität.

Nasschemische Speicher (Redox-Flow) hingegen sind noch in einem frühen Entwicklungsstadium. Einzelne Prototypen sind bereits verfügbar, marktreife ist noch nicht erreicht.

Die Technologie der Brennstoffzelle mit Wasserstoffspeicher ist aufgrund der hohen Kosten nur für Spezialanwendungen sinnvoll. Zukünftig ist hier mit Kostensenkungen zu rechnen.

T9 HLK-Systeme (Low-Ex)

Heiz-/Kühlsysteme und Wärmepumpen

Generell gilt hier, dass die entstehenden Heiz-/Kühllasten zunächst durch Effizienzmaßnahmen wie Dämmung der Gebäudehülle, effizienten Sonnenschutz und Minimierung der internen Lasten durch z. B. energiesparende Geräte minimiert werden müssen. Die noch verbleibenden Heiz-/Kühllasten sind dann möglichst effizient bereitzustellen.

Nachlüftungskonzepte sowie mechanische Lüftungssysteme mit Wärme-/Kälterückgewinnung werden bereits seit vielen Jahren erfolgreich eingesetzt. Zur Vorwärmung/-kühlung der Außenluft werden oft Erdreichwärmetauscher verwendet. Forschungsbedarf besteht hier noch in optimierten Regelstrategien wie z. B. bedarfsgeordneten Systemen mit kostengünstiger CO₂-Kontrolle. Im Bereich Wärme-/Kälterückgewinnung wird auch immer mehr an sogenannten Enthalpietauschern geforscht, die neben der Wärme auch die Feuchte rückgewinnen. Dies kann z. B. durch Sorptionsmaterialien oder Membranen geschehen.

Flächenheiz-/kühlsysteme und Bauteilaktivierung mit konventioneller Kälteerzeugung – z. B. Kompressionskältemaschine – sind mittlerweile ebenfalls Stand der Technik und werden im Neubau eingesetzt. Systeme mit Umweltenergie beginnen sich seit einigen Jahren immer mehr im Markt zu etablieren. Zu erwähnen sind hier vor allem geothermische Systeme wie z. B. Erdsonden oder –kollektoren, aber auch Luft/Wasserwärmepumpen. In diesem Bereich besteht aber noch Forschungsbedarf. Ebenso in den Bereichen adiabate oder solare Kühlung und solare Wärmepumpen. Im Gegensatz zum Neubau stellt die Umsetzung der Technologie im Gebäudebestand eine erhebliche Investition für den Eigentümer dar.

Ein vielversprechender Ansatz und Gegenstand aktueller Forschung ist der Einsatz von Phasenwechselmaterialien (PCM) zur Gebäudekühlung. Diese können dezentral entweder mikroverkapselt in Baumaterialien integriert – z. B. PCM-Gipsbauplatten oder PCM-Putz – oder in anderweitig verkapselter Form in den Raum eingebracht werden – z. B. PCM-Platten in Kühldecken. Die Kühlwirkung der PCM erfolgt in aller Regel rein passiv, sobald die Raumtemperatur die Phasenwechseltemperatur überschreitet. Hierdurch kann das PCM Temperaturspitzen puffern und Kühllasten vom Tag in die Nacht verschieben. Generell befindet sich diese Technologie was den Gebäudebereich betrifft noch in den Phasen Technologieentwicklung bis Demonstration. Es sind nur wenige kommerzielle PCM-Systeme erhältlich.

Insgesamt ist das Themenfeld Low-Ex-Systeme sehr breit gefächert, da hier sinnvollerweise komplette Systeme betrachtet werden müssen. Es umfasst Lüftungs- und wärme-/kältetechnische Anlagen, Wärmepumpen, Wärmespeicher, Wärmeübertrager bis hin zu Pumpen sowie kompletten Rohr- und Verteilsystemen.

Ein hohes Effizienzsteigerungspotenzial und damit einhergehend auch ein hoher Entwicklungsbedarf besteht bei allen Low-Ex-Systemen neben der Entwicklung und Optimierung neuer Materialien und der Weiterentwicklung der Einzelkomponenten vor allem in deren Zusammenspiel bzw. in der Kombination mehrerer Einzelkomponenten zu einem sinnvollen Gesamtsystem mit höherer Effizienz. Dies setzt aller-

dings teilweise aufwendige System- und Regeloptimierungen sowie deren Kontrolle im Betrieb voraus. So können z. B. PCM oder Speicher helfen, die üblicherweise tagsüber anfallenden Kühllasten in die Nacht zu verschieben, wenn die Kälte effizienter erzeugt werden kann. Spitzenlasten können gepuffert und dadurch Kälteerzeugungssysteme sowie Pumpen und Verteilsysteme kleiner dimensioniert werden. Insbesondere im Bereich PCM besteht Bedarf an sinnvollen Regelkonzepten, da PCM-Systeme mit herkömmlichen Regelstrategien oft nicht effizient arbeiten.

Mikro-KWK

Zur Energieerzeugung in Mikro-KWK werden heute neben Verbrennungsmotoren (Otto, Sterling) auch Dampfmaschinen (Dampfexpansion, Organic Rankine Cycle, Gasturbine) und Brennstoffzellen eingesetzt (Bachor et al. 2013). Mikro-KWK sind überall dort sinnvoll einsetzbar, wo ein Bedarf an elektrischer und thermischer Energie – idealerweise mit einem ganzjährigen Wärmebedarf – besteht. Dabei erzeugen sie primär Heizwärme und Trinkwarmwasser. Als Energieträger dienen meist Erdgas, Flüssiggas, Bio-Erdgas oder Heizöl. Mikro-KWK eignet sich gut für die Sanierung von Heizsystemen in bestehenden Gebäuden. Zur Deckung der thermischen Spitzenlast benötigen die Anlagen zusätzlich Spitzenlast-Wärmeerzeuger. Um eine gleichmäßige Auslastung des Mikro-KWK zu gewährleisten werden außerdem noch Pufferspeicher verwendet. Insbesondere bei einem hohen Eigennutzungsanteil des erzeugten Stromes können Mikro-KWK-Anlagen wirtschaftlich arbeiten. Bei direkter Regelmöglichkeit durch Energieversorger und Einbindung in das Smart Grid können Mikro-KWK-Anlagen als virtuelle Kraftwerke dienen und somit kritische Netzlasten ausgleichen sowie das Stromnetz stabilisieren.

T10 Kunstlicht (LED, OLED)

Aktuell ersetzen LEDs die über Jahrzehnte eingesetzten Glühlampen. Dadurch ist ein deutliches Energieeinsparpotential gegeben. Der Ersatz einer 60 W Glühlampe durch eine 6 W LED spart etwa 90 % Energie ein – bei ähnlicher Lichtausbeute. Am 17. September 2009 wurde endgültig das Glühlampenverbot vom Europäischen Parlament beschlossen. Seit September 2009 beschränkt dieses Verbot schrittweise den Verkauf und die Herstellung von Glühlampen zu Gunsten von neuen und effizienten Beleuchtungstechniken wie LED-Lampen und anderen Energiesparalternativen.

Die Integration von LEDs in intelligente Beleuchtungssysteme steckt noch in den Anfängen. Auch organische Leuchtdioden stehen in der Entwicklung noch eher in einem frühen Stadium. Erste Produkte mit der Verwendung von OLED gibt es bereits auf dem Markt, darunter Smartphone Displays oder Fernseher. Potential zur Kostenreduktion in der Herstellung ist der mögliche Wechsel von thermischem Verdampfen hin zu Rolle-zu-Rolle Druckverfahren.

Teilkriterium 2.2 Technisches und wirtschaftliches F&E-Risiko

T6 Gebäudeautomation

Bei der Gebäudeautomation ist bei der Risikobeurteilung zu unterscheiden in:

- Softwareentwicklungen: Hier ist das technische Risiko eher gering, da oft auf bestehende Systeme aufgesetzt wird bzw. bestehende Systeme weiterentwickelt werden. Das wirtschaftliche Risiko ist eher hoch, da die Softwareentwicklungen an die sehr dynamischen technischen Entwicklungen der IT Schritt gekoppelt ist.
- Hardwareentwicklungen: Hier ist das technische und wirtschaftliche Risiko mittel bis eher hoch.

T7 Wärmespeicher

Risiken stellen die Verfügbarkeit geeigneter zyklenstabiler PCM und schlanker temperaturstabiler Hochleistungsdämmstoffe dar. Darüber hinaus birgt die Entwicklung der Steuer- und Regelungstechnik und deren Anschluss an das öffentliche Stromnetz ein Risiko. Unklar hierbei sind die zukünftige Angebotsseite an regenerativen Energien und der entsprechende Bedarf (Rolle der Elektromobilität).

T9 HLK-Systeme (Low-Ex)

Heiz-/Kühlsysteme und Wärmepumpen

Im Bereich der Low-Ex-Heiz-/Kühlsysteme liegt das FuE-Risiko in der komplexen und oft gewerkeübergreifenden Systemstruktur. Für effiziente Systeme ist es notwendig, mehrere Komponenten sinnvoll zu kombinieren und zu regeln. Insbesondere muss die Regelung jeweils speziell auf die Gebäudenutzung angepasst werden. Dies setzt eine entsprechende Betriebsoptimierungsphase nach der Installation voraus, die aus Kostengründen oft umgangen wird. Ein hohes wirtschaftliches Risiko besteht aufgrund der Komplexität im Bereich Systemoptimierung die verglichen mit einzelnen Komponenten deutlich schwerer eine Marktakzeptanz erreicht sowie in den oftmals höheren Investitionskosten der Systeme.

Mikro-KWK

Um Mikro-KWK effizient, wirtschaftlich und netzdienlich betreiben zu können müssen diese teilweise wärme- und stromgeführt betrieben sowie regelungstechnisch in das Stromnetz eingebunden werden. Dies erfordert aufwendige Regelstrategien und führt oft zu sehr komplexen Geschäftsmodellen. Zusätzlich erschweren bestehende Richtlinien das Erreichen der Wirtschaftlichkeit, z. B. die notwendige Zahlung der EEG-Umlage bei Contracting-Lösungen (Schubert et al. 2014).

T10 Kunstlicht (LED, OLED)

Es besteht noch Forschungsbedarf im Bereich der organischen Leuchtdioden. Aktuell gibt es weltweite Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Lichtausbeute. Nur durch den Einsatz von Schwermetallen lässt sich bei derzeitigen OLED, die auf dem Markt erhältlich sind, eine Lichtausbeute (sogenannte Externe Quanteneffizienz) von über 25 % erreichen mit dem Nachteil relativ hoher Produktionskosten. Neueste Erkenntnisse haben Materialansätze für OLED hervorgebracht, die auch ohne den Einsatz von Schwermetallen eine erhöhte Ausbeute ermöglichen (Stichwort: thermisch aktivierte verzögerte Fluoreszenz). Neben der Materialforschung müssen auch entsprechende Fertigungsprozesse weiterentwickelt werden. Aktuell werden OLED

überwiegend mittels thermischen Aufdampfens hergestellt. Ein mögliches Druckverfahren von OLED könnte in der Zukunft die Kosten zusätzlich senken.

Tab. 3-3 Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit dem Anwendungsbereich Gebäudesystemtechnik

	sehr gering	gering	eher gering	eher hoch	hoch	sehr hoch
T6 Gebäudeautomation						
Das technische Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das wirtschaftliche Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
T7 Wärmespeicher						
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
T8 Stromspeicher						
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
T9 HLK-Systeme (Low-Ex)						
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
T10 Kunstlicht (LED, OLED)						
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Teilkriterium 2.3 Rohstoffrisiken

Generell ist das Rohstoffrisiko im Anwendungsbereich Gebäudesystemtechnik niedrig einzustufen. Bei den Hardwarekomponenten besteht wie bei allen elektronischen Komponenten eine Abhängigkeit von kritischen Rohstoffen. Durch fortschreitende Miniaturisierung, Recycling und Substitution ist dieses Risiko jedoch als gering zu bewerten.

Aktuelle hocheffiziente organische Leuchtdioden basieren auf der Verwendung von *Schwermetallen* zur Steigerung der Lichtausbeute. Zudem wird meist als transparen-

te leitfähige Elektrode *Indium-Zinnoxid* verwendet. Die nur begrenzt verfügbaren Ressourcen an Indium begrenzen den Massenmarkt allein aufgrund der Verwendung des Indiums.

Zusammenfassung Förderrelevanz

Der Entwicklungsstand der Technologien im Anwendungsbereich Gebäudesystemtechnik weist eine große Bandbreite auf. Während die Weiterentwicklung einiger Komponenten durch industrielle Forschung und Entwicklung erfolgen kann, ist eine öffentliche FuE-Förderung in den jeweiligen Bereichen sinnvoll und notwendig, da zum einen Grundlagen erarbeitet oder komplexe Systeme gebildet werden müssen, Fragestellungen, die derart nicht von der Industrie gelöst werden können. Daher sind in allen beschriebenen Technologien Forschungs- und Entwicklungsbereiche identifizierbar, die eine Unterstützung der öffentlichen Hand rechtfertigen.

3.3 Detaillierte Bewertung des Anwendungsbereiches

3.3.1 Kriterium 3: Marktpotenziale

T6 Gebäudeautomation

Der SMART HOME Market Report (Huhn 2017) geht für den Zeitraum von 2016 bis 2021 von einem Marktwachstum (global) von 33 % für den Bereich Smart Home aus.

Der VDMA berichtet regelmäßig in seinen Pressemitteilungen von stabilem Umsatzwachstum. Im Jahr 2015 wurde ein stabiles Wachstum um 5,1 % und damit ein Umsatzvolumen von rund 1,23 Milliarden Euro alleine für Anbieter in Deutschland erreicht (Pressebox 2013).

T7 Wärmespeicher

In einer Prognos-Studie (Wünsch et al. 2013) wurde die langfristig bis 2050 benötigte Wärmespeicherkapazität zur Lastregelung von KWK-Anlagen in Deutschland auf 200 GWh abgeschätzt. Zur Bereitstellung dieser Speicherkapazität sind bei drucklosen Wärmespeichern etwa 4 Mio. m³ Speichervolumen notwendig (Wünsch et al. 2014). Dies entspricht einem Investitionsvolumen von rund 4 Mrd. Euro.

T9 HLK-Systeme (Low-Ex)

Laut einer Studie des Umweltbundesamtes aus dem Jahr 2011 (Bettgenhäuser et al. 2011; UBA 2011) betrug die Wohnfläche des Gebäudebestandes in Deutschland 2009 rund 3300 Mio. m² für Wohngebäude und rund 2400 Mio. m² im Bereich GHD, zusammen also rund 5700 Mio. m². Davon waren rund 874 Mio. m² gekühlt. Die beheizte Fläche dürfte nahezu mit der Gesamtwohnfläche identisch sein. Die Anzahl der Klimatisierungsgeräte in Deutschland betrug im Jahr 2005 rund 1,46 Mio. mit einer installierten Kühlleistung von 6,76 Mio. kW. Bis zum Jahr 2030 wird eine Erhöhung auf rund 3,3 Mio. Geräte mit 15,6 Mio. kW Kühlleistung prognostiziert (Riviere et al. 2008). In Deutschland werden jährlich ca. 700.000 Heizsysteme installiert (Bachor et al. 2013). Dies verdeutlicht das enorme Marktpotenzial im Anwendungsbereich HLK-Systeme.

T10 Kunstlicht (LED, OLED)

Neben einer bewussten Nutzung von Lichtquellen besteht ein großes Einsparpotential in der Benutzung von Festkörperleuchtmittel anstatt herkömmlicher Leuchtmittel. Durch einen kompletten Einsatz von intelligenten Leuchtmittel lassen sich jährlich 300 Mrd. € an weltweiten Stromkosten sparen und über 1000 Tonnen CO₂-Emissionen reduzieren (Photonics21 2010). Es wird erwartet, dass der globale Markt für Leuchtmittel von 35 Mrd. € 2010 auf über 55 Mrd. € im Jahr 2020 anwachsen wird (ELC und CELMA 2011). Während der Anteil von LEDs am Beleuchtungsmarkt 2012 lediglich 14 % betrug, wird prognostiziert, dass im Jahr 2020 mehr als 90 % der Lichtquellen Festkörperleuchten (LED, OLED) sein werden.

3.3.2 Kriterien 3-9 integrale Betrachtung

Die Kriterien 3-9 werden für das Technologiefeld Energieeffiziente Gebäude und Gebäudetechnik integral betrachtet und sind unter Kapitel 6 dargestellt.

3.3.3 Kriterium 10: Unternehmerisch-technische Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit

Auf der einen Seite ist bei der Technologie Gebäudeautomation mit einer Zunahme der Komplexität zu rechnen. Andererseits nimmt die Leistungsfähigkeit der Planungstools immer weiter zu. Daher ist mit etwa gleichbleibenden Planungszeiten zu rechnen.

Die Nutzungsdauern werden konstant bleiben oder ggf. etwas abnehmen aufgrund der immer schneller werdenden Entwicklungszyklen in diesem Anwendungsbereich.

Im privaten Bereich ist mit höherer Investitionsmenge und sinkenden spezifischen Kosten zu rechnen, daher wird die Investitionshöhe gleichbleiben bzw. leicht ansteigen. Im gewerblichen Bereich/Objektbau ist wegen der immer höher werdenden Komplexität mit steigenden Investitionen zu rechnen. Dies kann jedoch durch verschiedene Contracting-Modelle abgefedert werden. Ebenfalls kann die Tatsache, dass durch ein umfangreiches Gebäudemonitoring eine Kostenkontrolle und –einsparung überhaupt erst möglich ist, einen entsprechenden Investitionsanreiz bieten.

Tab. 3-4 Indikatoren zur Bewertung der Pfadabhängigkeit und Reaktionszeit des Anwendungsbereiches Gebäudesystemtechnik

Variable	Einheit	Heute	2020	2030	2040	2050
Planungszeit (Neubau/Bestand)	Monate	15/2	15/1	14/1	14/1	14/1
Bauzeit (Neubau/Bestand)	Monate	13/1	14/1	14/1	14/1	14/1
Heute übliche ökonomische Nutzungsdauer	Jahre	15	15	14	14	13

Bei der Nutzungsdauer ist eine geschätzte mittlere Lebensdauer der Hardwarekomponenten angegeben. Bei der maximal möglichen Lebensdauer einer Komponente wäre noch zwischen Verkaufsende und Supportende zu unterscheiden. Hier (MeGA 2013) liegt die Bandbreite zwischen 15 und 25 Jahren. Aufgrund der Heterogenität

der Technologien des Anwendungsbereiches können keine spezifischen Investitionen bzw. der Anteil fixer Kosten angegeben werden.

3.3.4 Kriterium 11: Abhängigkeit von Infrastrukturen

Die Gebäudesystemtechnik ist durch die notwendige Kopplung des Gebäudes an ein intelligentes Versorgungsnetz (Smart Grid) auf moderne zukunftsfähige IKT-Systeme angewiesen.

Eine kritische Abhängigkeit in Bezug auf die Marktdurchdringung bestimmter dezentraler KWK-Technologien ist durch die Wahl der Energieträger gegeben, z. B. den Ausbau eines Wasserstoff-Versorgungsnetzes.

Tab. 3-5 Abhängigkeit des Anwendungsbereiches Gebäudesystemtechnik von Infrastrukturen

	Ja	Nein
Die Nutzung der Technologie(n) ist <i>unabhängig</i> von Infrastrukturen möglich.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Die Nutzung und Verbreitung der Technologie(n) ist von <i>bestehenden</i> Infrastrukturen abhängig.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Zur Verbreitung und Nutzung der Technologie(n) müssen <i>bestehende</i> Infrastrukturen ausgebaut werden.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Zur Verbreitung und Nutzung der Technologie(n) müssen <i>neue</i> Infrastrukturen gebaut werden.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

3.3.5 Kriterium 12: Systemkompatibilität

Generell ist die Gebäudesystemtechnik als systemkompatibel einzustufen. Für einzelne Technologien, die Pfadabhängigkeiten aufzeigen, stehen ausreichend Alternativen zur Verfügung, so dass sich hier keine kritischen Abhängigkeiten ergeben.

Der überwiegende Anteil der Technologien des Anwendungsbereiches Gebäudesystemtechnik ist sowohl im Einzelfall als auch bei hohem Einsatz als systemkompatibel einzustufen, da sie keine negativen Rückwirkungen auf bestehende Systeme aufweisen, parallel zusammen arbeiten können bzw. austauschbar sind.

Die Ausnahme stellen je nach Technologieauslegung Wärmepumpen und Mikro-KWK dar. Für beide werden die potenziellen Rückwirkungen als vernachlässigbar eingeschätzt. Bei hoher Durchdringung der Technologien hingegen, werden Rückwirkungen auf das Stromnetz erwartet. Diese Schwankungen können jedoch mit der Technologie Stromspeicher wieder aufgefangen werden, so dass der Aufwand zur Herstellung der Systemkompatibilität niedrig einzustufen ist.

Die Wechselwirkungen mit anderen Systemen sind daher im Ganzen synergetisch einzuschätzen, da die mit den Technologien einhergehende Netzdienlichkeit das Stromnetz entlastet. Insbesondere vor dem Hintergrund der Digitalisierung und Vernetzung können Gebäude einen großen Beitrag zu einem stabilen Stromnetz der Zukunft leisten.

4 Anwendungsbereich Planung und Gebäudebetrieb

4.1 Beschreibung

Für die Realisierung von energie- und ressourceneffizienten Gebäuden kommt der Planungsphase, der richtigen Auswahl und Kombination der Produkte, der sachgerechten Verwendung der Produkte und Ausführung der Gewerke besondere Bedeutung zu. Die Planenden sind dabei angewiesen, für verschiedene Planungsstadien einen Überblick über die technische Leistungsfähigkeit des Gebäudes, der ökonomischen und ökologischen Implikationen in Bezug auf die Errichtung und den Betrieb zu haben, um Entscheidungsgrundlagen für den Bauherrn bereitstellen. Dabei ist eine integrale Planung durchzuführen, die fachübergreifend optimale Lösungen für die Planungsaufgabe ermöglicht. Viele Fragestellungen lassen sich nur mittels zeitaufgelöster Simulation unter Berücksichtigung von Standort- und benutzertypischen Datensätzen (z. B. Wetterdaten, Nutzerprofile) mit der notwendigen Genauigkeit ermitteln.

Vor dem Hintergrund der ansteigenden Komplexität der Einzelkomponenten ist die verstärkte Fortbildung der Akteure im Bauwesen essentiell, damit die theoretischen Potenziale auch in der Praxis umgesetzt werden können – dies gelang in der Vergangenheit nicht immer.

Für den energieeffizienten Gebäudebetrieb ist es unabdingbar Werkzeuge zu implementieren, die diesen auch feststellen können. Eine korrekte Planung bildet zwar die Voraussetzung für ein energieeffizientes Gebäude, stellt aber nicht den effizienten Betrieb sicher. Baumängel oder nicht korrektes Zusammenwirken der Gebäudesystemtechnik können diesen verhindern. Gleichsam benötigen Nutzer und Gebäudebetreiber eine Rückmeldung über aktuelle Verbrauchswerte, um die Energieeffizienz des Gebäudes optimieren zu können.

Ein zentrales zukünftiges Querschnittsthema wird das Erfassen und Halten von u. U. sensiblen größeren Datenmengen sein. Dabei sind neben technischen Aspekten auch juristische Fragestellungen zu klären.

Beschreibung T11: Informationsmanagement (BIM)

BIM – Building Information Modeling (deutsch: Modellierung auf Basis von Gebäudedaten) ist ein Ansatz, um alle die am Gebäudebau und dessen Bewirtschaftung mitwirken, schnell und sicher mit aktuellen Daten zu versorgen, damit dieses in ökonomischer und ökologischer Hinsicht optimal erstellt und betrieben werden kann.

Insbesondere im Bereich der Bauphysik gibt es noch Handlungsbedarf. Die Bauphysik ist in besonderem Maß auf die Arbeiten mit digitalen Gebäudemodellen angewiesen. Als Beispiele seien genannt:

Der Energiesparnachweis mit dem Mehrzonenmodell nach V DIN 18599 ist ohne graphische Unterstützung nicht mehr sinnvoll durchzuführen. Die Komplexität der Eingaben erfordert die visuelle Kontrolle der Eingaben am grafischen Modell.

Der Energiesparnachweis ist softwareseitig meist eine Insellösung, die Weiterverwendung der Eingabedaten, z. B. für die thermische Gebäudesimulation, ist nur mit

einzelnen Programmen möglich. Es existieren keine plattformübergreifenden Lösungen.

Der Schallimmissionsschutz arbeitet seit rund zwanzig Jahren mit digitalen Gebäudemodellen und Ausbreitungsmodellen. Bis heute fehlt der Anschluss an die Planungsdaten des Gebäudemodells zur Festlegung der Schallschutzanforderungen an Bauteile.

Die bautechnischen Informationen müssen aus einer Vielzahl unabhängiger Datenbanken zusammengetragen werden. Eine Zusammenführung der produktbezogenen Datenbankinhalte ist für das Arbeiten mit BIM unerlässlich.

Auch für Anwendungen wie Tageslichtberechnungen und -simulationen, raumakustische Berechnungen und -simulationen, Ökobilanzen u. a. m. gibt es zahlreiche gute Lösungen, es fehlt jedoch häufig die Kommunikationsmöglichkeit mit dem digitalen Gebäudemodell des Planers, weil die vorhandenen Schnittstellen bisher nicht für diese Anwendungen entwickelt sind. Als Folge entstehen immer neue Insellösungen. Viele Hersteller setzen inzwischen ihre Programme auf eigen-entwickelte oder kostengünstig zugekaufte CAD-Software auf, die mit anderen Standards nicht ausreichend kompatibel sind.

Beschreibung T12: Life Cycle Assessment

Die Ökobilanz, kurz LCA (Life Cycle Assessment), dient als Instrument zur Bewertung von Umweltqualitäten von Gebäuden. Hierdurch können die Umweltwirkungen eines Systems berechnet und dargestellt werden. Aufbauend auf der vom BBSR (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung) herausgegebenen Baustoffdatenbank ÖKOBAUDAT wird unter Berücksichtigung sich anschließender Lebenszyklusphasen eine quantifizierende Bewertung von Gebäuden möglich. Eine bereits in der Planungsphase durchgeführte Ökobilanzierung unterstützt die zielgerichtete Realisierung von energie- und ressourceneffizienten Gebäuden und hilft Fehlentwicklungen zu vermeiden.

Beschreibung T13: Monitoring und Diagnose

Gebäudeüberwachung, Analyse, Information und Dienstleistung für Endnutzer und Gebäudebetreiber tragen wesentlich zu einer Energieeffizienzsteigerung beim Gebäudebetrieb bei. Methoden zur Datenerfassung, Vorverarbeitung, Modellierung, Visualisierung und Interpretation der Ergebnisse und das Teilen dieser neuen Informationen mit den Endbenutzern werden von (Skön 2015) präsentiert. Das heutige BAS (Building Automation System) bietet eine enorme Menge an Daten über den Gebäudebetrieb. Die systematische Anwendung statistischer Methoden auf große Datenbestände (Data-Mining) ist ein nützliches und effizientes Werkzeug, um Aufschluss über das BAS zu bekommen (Xiao und Fan 2014). Data Mining-Techniken können in eine BAS integriert und für Vorhersage, Diagnose und Optimierung verwendet werden. Ein wichtiges Thema für Energie- und Steuerungsmanagement in der Gebäudeautomation ist das Harmonisieren des Konflikts zwischen dem Gesamtenergiebedarf und dem Komfort der Benutzer.

Beschreibung T14: Nutzer-Gebäude Beziehung und Schnittstellen

Der Komfort und die Nutzerzufriedenheit treten immer mehr in den Fokus der Gebäudebetreiber. Bei der Betriebsoptimierung liegt der Schwerpunkt zunehmend auf der Minimierung des Energiebedarfes. Auf der anderen Seite versucht der Nutzer, im Rahmen seiner Eingriffsmöglichkeiten auf die Haustechnik, seinen Komfort zu maximieren. Dadurch können die durch Betriebsoptimierung erreichten Einsparungen verringert oder gar überkompensiert werden (Rebound-Effekt), siehe beispielsweise Stevenson und Leaman (2010) und Stinson et al. (2015).

4.2 Relevanz öffentlicher Förderung

4.2.1 Kriterium 1: Vorlaufzeiten

T11: Informationsmanagement (BIM)

Für die Erstellung eines leistungsfähigen plattformunabhängigen Standards zum Transport der wesentlichen bauphysikalischen Daten in das digitale Gebäudemodell (in weiterverwertbarer Form, z. B. in Ausschreibung, Angebot, Vergabe, Revision, Facility Management und für die End-of-life-Strategie) wird ein Zeitraum von 6 Jahren angesetzt.

T12: Life Cycle Assessment

Die Optimierung von leistungsfähigen Life Cycle Assessment Tools kann in kurzen Vorlaufzeiten innerhalb weniger Jahre abgebildet werden. Die fortlaufende Aktualisierung der der LCA zugrundeliegenden Daten erfordert ein leistungsfähiges Verfahren, da neue Produkte kontinuierlich erfasst werden müssen und sich bestehende Produktionsbedingungen wandeln.

T13: Monitoring und Diagnose

Verschiedene Standard-Monitoring Lösungen (z. B. Bus-fähige Wärmemengenzähler) sind bereits am Markt verfügbar. Jedoch ist es unerlässlich, dass für jedes Monitoring-Vorhaben ein individuelles Monitoring-Konzept (BMW) erstellt wird. Die Vorlaufzeit dafür beträgt 1-2 Jahre und findet idealerweise begleitend zur Planung der technischen Gebäudeausrüstung (TGA) statt. Neue Diagnoseverfahren (selbstlernende Systeme, Betriebsmustererkennung) sind in der Regel Softwarelösungen, deren Entwicklung typischerweise 1-2 Jahre dauert. Anschließend sind jedoch umfangreiche Feldtests erforderlich, die weitere 2-4 Jahre dauern können (um mehrere Heiz- bzw. Kühlperioden testen zu können). Für die Entwicklung von innovativen ganzheitlichen Monitoring- und Diagnosekonzepten mit hohem Anwendungspotential wird eine Vorlaufzeit von ca. 10 Jahren erwartet.

T14: Nutzer-Gebäude Beziehung und Schnittstellen

Aufgrund der Vielschichtigkeit sowohl der Nutzer als auch der Gebäude und des noch sehr jungen Forschungsstands bedarf es längerer Vorlaufzeiten. Diese gliedern sich in „Monitoring von Gebäude und Nutzer“ zu jeder Jahreszeit, Optimierung der Schnittstellen und wiederholtem Monitoring.

Tab. 4-1 Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung von Technologien im Anwendungsbereich Gebäudebetrieb und Planung

Abhängig von den verschiedenen Szenarienentwicklungen und öffentlicher Förderung ist mit der ersten kommerziellen Anwendung der weiterentwickelten Technologie in Deutschland zu rechnen ...

T11: Informationsmanagement (BIM)

Szenarienbereich DE_80 % bis 2020 ☐ bis 2030 ☒ bis 2040 ☐ bis 2050 ☐ nach 2050 ☐

Szenarienbereich DE_95 % bis 2020 ☐ bis 2030 ☒ bis 2040 ☐ bis 2050 ☐ nach 2050 ☐

T12: Life Cycle Assessment

Szenarienbereich DE_80 % bis 2020 ☐ bis 2030 ☒ bis 2040 ☐ bis 2050 ☐ nach 2050 ☐

Szenarienbereich DE_95 % bis 2020 ☐ bis 2030 ☒ bis 2040 ☐ bis 2050 ☐ nach 2050 ☐

T13: Monitoring und Diagnose

Szenarienbereich DE_80 % bis 2020 ☐ bis 2030 ☒ bis 2040 ☐ bis 2050 ☐ nach 2050 ☐

Szenarienbereich DE_95 % bis 2020 ☐ bis 2030 ☒ bis 2040 ☐ bis 2050 ☐ nach 2050 ☐

T14: Nutzer-Gebäude Beziehung und Schnittstellen

Szenarienbereich DE_80 % bis 2020 ☐ bis 2030 ☒ bis 2040 ☐ bis 2050 ☐ nach 2050 ☐

Szenarienbereich DE_95 % bis 2020 ☐ bis 2030 ☒ bis 2040 ☐ bis 2050 ☐ nach 2050 ☐

4.2.2 Kriterium 2: Forschungs- und Entwicklungsrisiken (technisch, wirtschaftlich, rohstoffseitig)

Teilkriterium 2.1 Entwicklungsstadium des Anwendungsbereiches Gebäudebetrieb und Planung

Das technische Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist im Bereich der Planungs- und Monitoringmethoden dahingehend gegeben, dass die Methoden einer wissenschaftlichen Evaluierung standhalten müssen. Dies ist besonders bei rein industriell entwickelnden Produkten ein wichtiger Aspekt. Auch müssen Neuentwicklungen im Bereich der Baumaterialien und Komponenten, die auch zunehmend komplexe dynamische bauphysikalisch relevante Eigenheiten aufweisen, rechtzeitig bei der Softwareentwicklung berücksichtigt werden.

Forschung und Entwicklung ist im LCA-Bereich von gesamtstaatlichen Interesse, um Fehlentwicklung zu vermeiden. LCA Daten müssen unabhängig erhoben und evaluiert werden, um im Wettbewerb stehende Produkte neutral zu bewerten. Kritisch ist hier ebenso die Handhabbarkeit der Methoden in der Praxis. Die Softwarelösungen müssen gerade hinsichtlich kleinerer Planungsbüros in der Lage sein, im Zuge der Vorplanungen Varianten schnell und zuverlässig zu bewerten.

T11: Informationsmanagement (BIM)

Insbesondere im Bereich der Bauphysik gibt es noch Handlungsbedarf. Die Bauphysik ist in besonderem Maß auf die Arbeiten mit digitalen Gebäudemodellen angewiesen. Als Beispiele seien genannt:

- Der Energiesparnachweis mit dem Mehrzonenmodell nach V DIN 18599 ist ohne graphische Unterstützung nicht mehr sinnvoll durchzuführen.
- Der Energiesparnachweis ist softwareseitig meist eine Insellösung.
- Die bautechnischen Informationen müssen aus einer Vielzahl unabhängiger Datenbanken zusammengetragen werden. Eine Zusammenführung der produktbezogenen Datenbankinhalte ist für das Arbeiten mit BIM unerlässlich.
- Auch für Anwendungen wie Tageslichtberechnungen und -simulationen, raumakustische Berechnungen und -simulationen, Ökobilanzen u. a. m. gibt es zahlreiche gute Lösungen, es fehlt jedoch häufig die Kommunikationsmöglichkeit mit dem digitalen Gebäudemodell des Planers.
- Es fehlt an vereinheitlichten Festlegungen über die Herkunft baurechtlich belastbarer Eingabedaten.

Der aktuelle BIM-Stufenplan der Bundesregierung bezieht die oben genannten Aspekte nicht ein. Dabei wird verkannt, dass die spezialisierten Fachbüros der Bauphysik, des Brandschutzes, der Nachhaltigkeitsberatung u. a. m. einen sehr wesentlichen Beitrag zum qualitätsvollen, energieeffizienten und nachhaltigen Bauen leisten

T12: Life Cycle Assessment

Aktuell gibt es national und international eine Vielzahl von LCA-Software Tools, die sich in Genauigkeit, Leistungsfähigkeit und Handhabbarkeit zum Teil deutlich unterscheiden (Kleiner et al. 2016). Eine einheitliche und transparente Datenbasis ist nicht vorhanden und erschwert die Bewertung von auf LCA-basierenden Erkenntnissen. LCA-Analysen sind idealerweise in bestehende Planungstools, z. B. BIM einzubinden. Derzeit werden neue Material und Konstruktionsentwicklungen nur sehr zeitverzögert in LCA-relevanten Datenbanken abgebildet.

T13: Monitoring und Diagnose

Verschiedene Standard-Monitoring Lösungen (z. B. busfähige Wärmemengenzähler) sind bereits am Markt verfügbar. Das Gebäudemonitoring wird in der Regel entweder durch eine individuelle Sonderlösung durchgeführt (und dies manchmal auch nur temporär) oder es wird durch die Gebäudeautomation mit durchgeführt. In diesem Fall besteht eine enge Verzahnung mit T6 Gebäudeautomation.

Bei der Weiterverarbeitung der erfassten Daten sind derzeit aber nur nicht untereinander kompatible Insellösungen verfügbar. Hier würden Vereinheitlichungen und Normungen die Marktdurchdringung verbessern.

Weiterer hoher FuE Bedarf besteht bei Systemen, die neben den physikalischen Messgrößen auch den empfundenen Benutzerkomfort (z. B. durch automatisierte Nutzerbefragung) ermitteln und bewerten. Hier besteht eine enge Verzahnung mit T15.

T14: Nutzer-Gebäude Beziehung und Schnittstellen

Die Optimierung der Nutzer-Gebäude-Beziehung steht noch am Anfang ihrer Entwicklung. Zwar wurden einige Einzelfallstudien an konkreten Gebäuden durchgeführt, aber umfangreiche Studien unter Berücksichtigung soziologischer und psychologischer Aspekte sowie ein direktes Feedback des Nutzers liegen nicht vor. Dennoch zeigen die Einzelfallstudien auf, welche Änderungen im Endenergieverbrauch durch Optimierungen in der Nutzer-Gebäude Beziehung möglich sind.

Tab. 4-2 Aktuelles Entwicklungsstadium des Anwendungsbereiches Planung und Gebäudebetrieb

Grobklassifizierung	Feinklassifizierung	T11	T12	T13	T14
Grundlagenforschung					
	TRL 1 – Grundlegende Prinzipien beobachtet und beschrieben, potentielle Anwendungen denkbar	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Technologieentwicklung					
	TRL 2 – Beschreibung eines Technologiekonzepts und/oder einer Anwendung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	TRL 3 – Grundsätzlicher Funktionsnachweis einzelner Elemente einer Anwendung/Technologie	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	TRL 4 – Grundsätzlicher Funktionsnachweis Technologie/Anwendung im Labor	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Demonstration					
	TRL 5 – Funktionsnachweis in anwendungsrelevanter Umgebung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	TRL 6 – Verifikation mittels Demonstrator in anwendungsrelevanter Umgebung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	TRL 7 – Prototypentest in Betriebsumgebung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	TRL 8 – Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit in Betriebsumgebung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Kommerzialisierung					
	TRL 9 – Erfolgreicher kommerzieller Systemeinsatz	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

TRL= Technology Readiness Level

T11: Informationsmanagement (BIM), T12: Life Cycle Assessment, T13: Monitoring und Diagnose, T14: Nutzer-Gebäude Beziehung und Schnittstellen

Um etwa nicht umgesetzte Energieeinsparpotenziale durch den Rebound-Effekt zu vermeiden muss das Verbraucherverhalten in die energetische Sanierung mit einbezogen werden, wobei verlässliche Prognosen nur mit einer besseren Datengrundlage erstellt werden können (Sorrell et al. 2009). Nur durch die Miteinbeziehung der Nutzer kann daher das technisch mögliche Potenzial auch umgesetzt werden. Darüber

hinaus ist eine Erhöhung der Energieeinsparung durch proaktives Nutzerverhalten möglich. Durch ein gezieltes Feedback an den Nutzer konnte beispielsweise ein 20 % niedriger Gasverbrauch in Bezug zu einer Vergleichsgruppe ohne Nutzerfeedback realisiert werden (Stinson et al. 2015). Hier herrscht FuE-Bedarf in der Umsetzung der Rückmeldung durch ein intuitives, eingängiges und effektives Feedback, da die gesamte Bevölkerung die Zielgruppe der Maßnahme ist.

Teilkriterium 2.2 Technisches und wirtschaftliches F&E-Risiko

Das technische Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist im Bereich der Planungs- und Monitoringmethoden dahingehend gegeben, dass die Methoden einer wissenschaftlichen Evaluierung standhalten müssen. Dies ist besonders bei rein industriell entwickelnden Produkten ein wichtiger Aspekt. Auch müssen Neuentwicklungen im Bereich der Baumaterialien und Komponenten, die auch zunehmend komplexe dynamische bauphysikalisch relevante Eigenheiten aufweisen, rechtzeitig bei der Softwareentwicklung berücksichtigt werden.

Forschung und Entwicklung ist im LCA-Bereich von gesamtstaatlichen Interesse um Fehlentwicklung zu vermeiden. LCA Daten müssen unabhängig erhoben und evaluiert werden, um im Wettbewerb stehende Produkte neutral zu bewerten. Kritisch ist hier ebenso die Handhabbarkeit der Methoden in der Praxis. Die Softwarelösungen müssen gerade hinsichtlich kleinerer Planerbüros in der Lage sein, Varianten im Zuge der Vorplanungen schnell und zuverlässig zu bewerten.

T11: Informationsmanagement (BIM)

Da es nicht „den“ BIM-Standard gibt, müssen viele bereits existierende Software-Lösungen an ein zentrales zu entwickelndes System angeschlossen werden. Diese Schnittstellenentwicklungen bergen Risiken in der Systemfestlegung. Es müssen flexible Strukturen geschaffen werden, die an zukünftige Entwicklungen anpassbar sind. Im Bereich des Datenmanagements muss sehr sorgfältig gearbeitet werden, um softwareseitige Fehlplanungen auszuschließen.

T12: Life Cycle Assessment

LCA-Methoden bedürfen einer kontinuierlichen Weiterentwicklung. Dabei ist die Verknüpfung mit anderen Planungssoftmethoden (BIM, Gebäudemodellierung) anzustreben. Die neuen Methoden sind auch anhand von Demonstrationsvorhaben zu evaluieren und dienen zur Konsolidierung bestehender Datenbanken.

T13: Monitoring und Diagnose

In Fällen, bei denen es sich nur um eine Weiterentwicklung/Optimierung bestehender Technologien (Hardware) oder Softwareentwicklungen handelt ist das technische Risiko im mittleren Bereich.

Aufgrund der langen Vorlaufzeiten (siehe Kapitel 3.3.1) einer Technologie kann jedoch ein erhebliches wirtschaftliches Risiko bestehen, insbesondere, wenn sich während der Vorlaufzeit das technische Umfeld oder die Marktsituation ändert.

T14: Nutzer-Gebäude Beziehung und Schnittstellen

Für diesen Technologiezweig ist die Akzeptanz der Nutzer wesentlich und dürfte das Hauptrisiko darstellen.

Tab. 4-3 Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit Anwendungsbereich Planung und Gebäudebetrieb

	sehr gering	gering	eher gering	eher hoch	hoch	sehr hoch
T11: Informationsmanagement (BIM)						
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
T12: Life Cycle Assessment						
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
T13: Monitoring und Diagnose						
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
T14: Nutzer-Gebäude Beziehung und Schnittstellen						
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Teilkriterium 2.3 Rohstoffrisiken

Im Bereich Planung und Gebäudebetrieb existieren keine direkten Rohstoffrisiken.

Zusammenfassung Förderrelevanz

Aufgrund der weichenstellenden Funktion von Planung und Betriebsführung für eine energieeffiziente Infrastruktur und deren effizienten Betriebes besteht hier ein öffentliches Interesse. Lange Vorlaufzeiten und übergeordnete Interessen lassen eine öffentliche Förderung gerechtfertigt erscheinen.

4.3 Detaillierte Bewertung des Anwendungsbereiches

4.3.1 Kriterium 3: Marktpotenziale

Für das Energieeinsparpotential im Bereich Gebäudebetrieb sind noch keine Belastbaren Studien bekannt. Erfahrungen aus durchgeführten Projekten weisen auf ein Einsparpotential im Bereich von 10 % des Endenergiebedarfs in diesem Bereich hin. Nur durch Monitoring kann ein ineffizienter bzw. falscher Betrieb des Gebäudes überhaupt erkannt werden kann und damit ein Einsparpotential genutzt werden, was sonst über eine jahrzehntelange Betriebsdauer des Gebäudes brachliegen würde.

Basierend auf den prognostizierten Werten von Tab. 6-1 für das gesamte Einsparpotential im Bereich Energie- und Ressourceneffiziente Gebäude ergibt sich damit folgendes Einsparpotential:

Tab. 4-4 Einsparpotenzialabschätzung des Anwendungsbereiches Planung und Gebäudebetrieb

Jahr	Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %	
	TWh		TWh	
	Min	Max	Min	Max
2020	5	12	7	9
2030	9	25	23	26
2040	30	35	34	39
2050	39	43	42	45

4.3.2 Kriterien 3-9 integrale Betrachtung

Die Kriterien 3-9 werden für das Technologiefeld Energieeffiziente Gebäude und Gebäudetechnik integral betrachtet und sind unter Kapitel 6 dargestellt.

4.3.3 Kriterium 10: Unternehmerisch-technische Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit

Höhere Anforderungen an die Planung und zunehmende Komplexität wird in Verbindung mit verbesserten Planungswerkzeugen zu weitgehend konstanten Planungszeiten führen. Dies trifft insbesondere für komplexe Bauvorhaben zu. Im Wohnungsbau hingegen werden Vorteile durch Vereinfachung und strafferer Planungsabläufe zu erwarten sein.

4.3.4 Kriterium 11: Abhängigkeit von Infrastrukturen

Für diesen Anwendungsbereich wird keine kritische Abhängigkeit von Infrastrukturen gesehen. Ein leistungsfähiges IKT-System ist für den betrachteten Anwendungsbereich nötig. Die bestehenden Systeme sind bereits leistungsfähig genug und werden darüber hinaus fortwährend leistungsfähiger um auch in Zukunft noch komplexere Aufgabenstellungen bewältigen zu können.

Tab. 4-5 Abhängigkeit des Anwendungsbereiches Planung und Gebäudebetrieb von Infrastrukturen

	Ja	Nein
Die Nutzung der Technologie(n) ist <i>unabhängig</i> von Infrastrukturen möglich.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Die Nutzung und Verbreitung der Technologie(n) ist von <i>bestehenden</i> Infrastrukturen abhängig.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Zur Verbreitung und Nutzung der Technologie(n) müssen <i>bestehende</i> Infrastrukturen ausgebaut werden.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Zur Verbreitung und Nutzung der Technologie(n) müssen <i>neue</i> Infrastrukturen gebaut werden.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

4.3.5 Kriterium 12: Systemkompatibilität

Die Technologien des Anwendungsbereichs Planung und Gebäudebetrieb werden in allen Anwendungsfällen als vollständig systemkompatibel eingeschätzt, da sie keine Rück- bzw. Wechselwirkungen zu bestehenden Systemen aufweisen. Daher entsteht auch kein Mehraufwand zur Herstellung der Systemkompatibilität. Wechselwirkungen zum Gesamtsystem sind grundsätzlich synergetisch, da die Technologien einen Mehrwert darstellen, der auf bestehende Systeme aufsetzt und ungenutzte Potenziale freisetzt.

5 Quartiere

Quartiere sind Stadtteile oder Untereinheiten, die sich räumlich, bzgl. der vorhandenen Infrastruktur oder der sozialen und kulturellen Struktur von anderen Teilen der Stadt abgrenzen lassen. Sie zeichnen sich ebenso durch eine lokale Identität und hohe Interaktionsdichte aus (Alisch 2002). Quartiere haben aufgrund der Notwendigkeit der energetischen Gebäudesanierung und der Tatsache, dass eine Vielzahl von neuen Quartieren entsteht, im Zeitraum von 1990 bis Ende 2011 mehr als 300 neue Stadtquartiere, eine herausgehobene Bedeutung (Breuer und Schmell 2012). Die Entwicklung von abgestimmten Energieinfrastrukturen innerhalb von Quartieren ermöglicht das Heben von Synergiepotentialen.

Wesentliche Handlungsfelder für Forschungs- und Entwicklungsansätze zur Realisierung von energieeffizienten Quartieren sind (PTJ 2015):

- Integration von Wärme aus erneuerbaren Energien und Abwärme in Infrastrukturen zur Versorgung von Bestandsquartieren (siehe auch *Technologieberichte 1.1: Bioenergie, 1.2: Geothermie, 1.4: Solare Wärme und Kälte, 3.2: Wärmetransport und -verteilung und 3.3: Energiespeicher*)
- Modellierung, Bewertung und Optimierung komplexer Energiesysteme von Quartieren und neue Entwicklungsmethoden und Ansätze für Transformationsprozesse.
- Energiekonzepte für Quartiere mit hohem Anteil erneuerbaren Energien und ihre Wechselwirkung mit dem übergeordneten Stromsystem (siehe auch *Technologieberichte 1.3: Photovoltaik und 7.1: Elektromobilität PKW und 7.2: Elektromobilität Hybrid-Oberleitungs-LKW*).

Eine Grundvoraussetzung bildet ein energieeffizienter und vernetzbarer Gebäudebestand.

6 Integrale Betrachtung der Kriterien 3 – 9

Das Technologiefeld Energieeffiziente Gebäude und Gebäudetechnik ist stark heterogen aufgebaut. Daher wird für die Bewertung ein integraler Ansatz gewählt, der sich über das gesamte Technologiefeld erstreckt.

6.1 Kriterium 3: Marktpotenziale

Teilkriterium 3.2 Nationales Marktpotenzial – integraler Ansatz

Für das nationale Marktpotential wird die mögliche Endenergie-Einsparung für Heizung und Warmwasser der privaten Haushalte und GHD im Vergleich zum Mittel der IST-Werte (BMWi 2017) von 2011-2015 (zur Glättung jährlicher Schwankungen) eruiert. Der für die betrachteten Klimaschutzszenarien prognostizierte Endenergiebedarf richtet sich nach der Zielvorgabe der Bundesregierung, dass 2050 ein nahezu klimaneutraler Gebäudebestand erreicht werden soll. Die Bandbreite des Endenergiebedarfes basiert für die betrachteten Klimaschutzszenarien auf nationalen Studien (DLR 2012; Thamling et al. 2015; Öko-Institut 2015).

Das nationale Marktpotenzial für das gesamte Technologiefeld ist in Tab. 6-1 dargestellt.

Tab. 6-1 Analyse des nationalen Marktpotenzials für das Technologiefeld Energie- und Ressourceneffiziente Gebäude

Jahr	Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %	
	Min	Max	Min	Max
Einheit	TWh/a		TWh/a	
2020	46	120	73	94
2030	94	249	233	255
2040	304	349	341	391
2050	389	428	424	451

Unter der Annahme, dass der Anteil des Endenergiebedarfs des Technologiefelds wie im Mittel der letzten IST-Daten (BMWi 2017) zu 72 % auf private Haushalte und 28 % GHD aufgeteilt ist und bis 2050 weitestgehend konstant bleibt, ergibt sich eine Reduktion der benötigten Endenergie für private Haushalte wie in Abb. 6-1 dargestellt. Dabei sind Prozesswärme, Klimakälte, IKT und Beleuchtung nicht enthalten. Die Mittelwerte aus den Minimal- und Maximalwerten der betrachteten Szenarien KS80 und KS95 sind sehr ähnlich – mit Ausnahme des Jahres 2030. Daran ist bereits ersichtlich, dass unabhängig von dem gewählten CO₂-Einsparungsziel im Gebäudebereich, die absolute Endenergieeinsparung maximal vorangetrieben werden muss und eine Szenarienabhängigkeit für Technologieentwicklungen in diesem Technologiefeld nicht relevant ist.

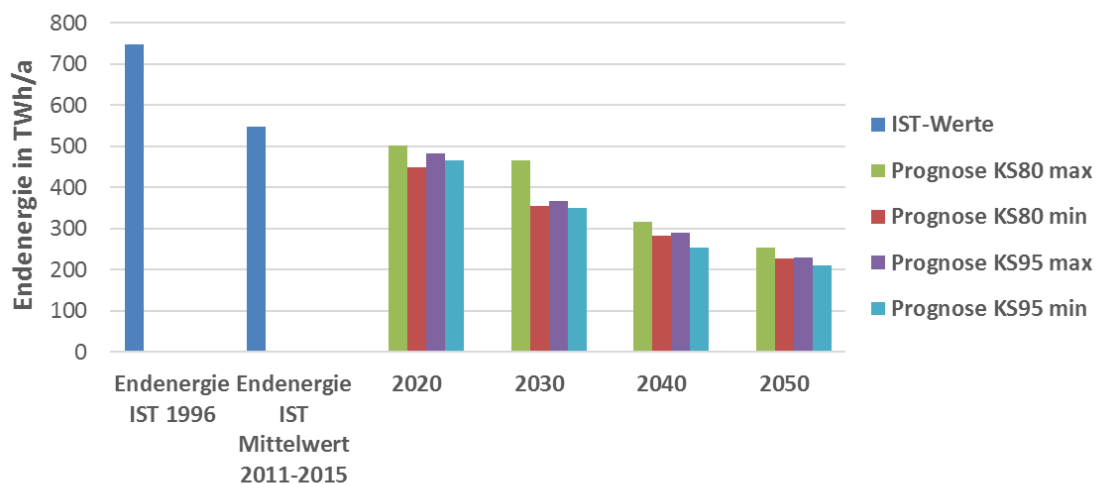


Abb. 6-1 Endenergiebedarf privater Haushalte für Raumwärme und Warmwasser, Ist-Werte und Prognosen

Wegen der im Vergleich zum Gebäudebestand vernachlässigbaren Neubaurate muss der Löwenanteil der Endenergieeinsparung über Sanierungsmaßnahmen realisiert werden. Für die folgende Abschätzung der nötigen Sanierungsrate wurde eine über alle Baualtersklassen gleichmäßige Sanierung auf Passivhausgebäudehülle angenommen. Anhand der Studie „Datenbasis Gebäudebestand“ (Diefenbach, Cischinsky et al. 2010), die eine Datengrundlage für den Zustand des Gebäudebestandes in Deutschland bildet, wurde eine Sanierungsrate von 2,4 % (KS80) bzw. 2,5 % (KS95) errechnet, so dass der Gebäudebestand im Jahr 2050 einen Gesamtsanierungsanteil von 89 % (KS80) bzw. 95 % (KS95) aufweist. Grundlage der Berechnung ist das TABULA-Verfahren mit Realkorrektur (IWU 2012). Die Hypothese einer konstanten Sanierungsrate begründet sich in der Annahme einer relativ konstanten Beschäftigungszahl in der Baubranche, mit deren Hilfe die energetischen Maßnahmen umgesetzt werden müssen.

Diese Abschätzung liegt im Bereich verschiedenster Studien, die die Sanierungsrate anhand verschiedener Klimaszenarien und Randbedingungen berechnet haben (Abb. 6-2). Eingezeichnet sind ebenso die in dieser Arbeit ermittelten notwendigen Sanierungsraten.

Es ist zu bemerken, dass die Sanierung der Altbauten auf Passivhausgebäudehülle nicht zu einem Heizwärmebedarf von 15 kWh/(m²a) führt, da z. B. die Ausrichtung des Gebäudes und Fensterflächen der Altbauten auch nach einer Sanierung nicht dem Passivhausstandard entsprechen. Der in den zugrundeliegenden Berechnungen ermittelte durchschnittliche Heizwärmebedarf liegt hingegen je nach Gebäudetyp zwischen ca. 35 - 50 kWh/(m²a).

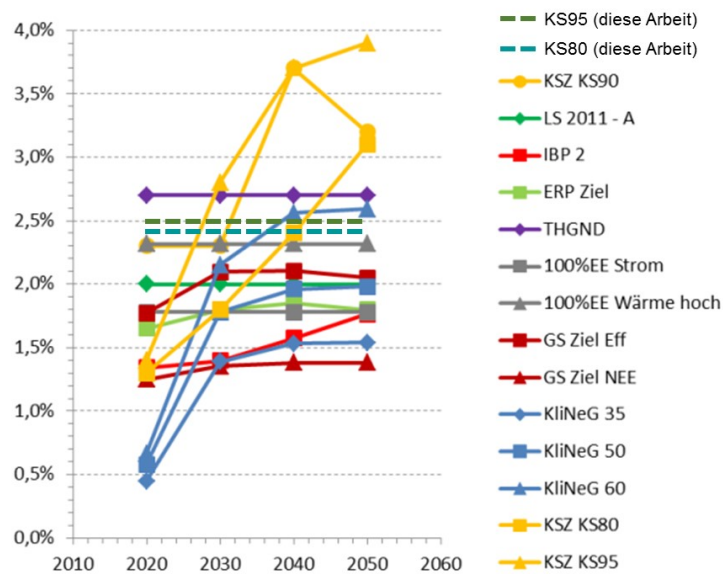


Abb. 6-2 In verschiedenen Studien ausgewiesene Sanierungsraten

Quelle: Öko-Inst. und ISI (2016)

Eine Aufschlüsselung nach Energieträgern (IWU 2015) zeigt, dass der Anteil an fossilen Brennstoffen in den nächsten Jahrzehnten deutlich abnehmen wird – bei gleichzeitigem starkem Ausbau der erneuerbaren Energien (siehe Abb. 6-3). Zur Sensitivitätsanalyse ist für das Jahr 2050 die Bandbreite der betrachteten Studien KS80 und KS95 (schwarzer Balken) und nach den in der Leitstudie des DLR (2012) betrachteten Szenarien (roter Balken) dargestellt.

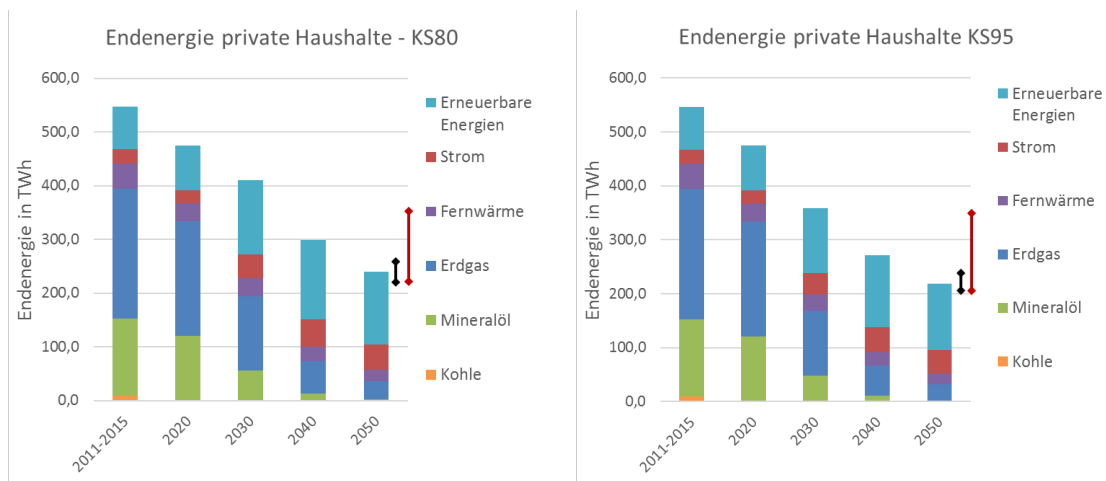


Abb. 6-3 Endenergiebedarf nach Energieträgern für die Klimaschutzszenarien KS80 und KS95

Die prozentuale Wärmeverteilung betrug im Jahr 2009 für Heizwärme und Warmwasser 82 % bzw. 18 % (BMWi 2017). Diese erhöht sich gemäß einer Prognose des IWU (IWU 2015) im dort diskutierten Szenario „Basis“ bis 2050 auf ein Verhältnis von etwa 75 % zu 25 %. Dabei ist anzumerken, dass das Szenario „Basis“ auf eine Ausgangsverteilung im Jahre 2009 von etwa 88 % zu 12 % ausging. Da die IST-Werte

bereits deutlich darüber liegen, wird der in 2050 zu erwartende Warmwasseranteil voraussichtlich über 25 % liegen.

Teilkriterium 3.1 Globales Marktpotenzial – integraler Ansatz

Im Gegensatz zur nationalen Betrachtung kann das internationale Marktpotential aufgrund des Bevölkerungswachstums und erhöhter weltweiter Durchdringung von Heiz- und Kühlsystemen nicht aus der Differenz zu aktuellen IST-Werten bestimmt werden.

Stattdessen werden hierzu Studien der International Energy Agency (IEA 2014, 2016) hinzugezogen und das fortschrittliche 2DS-Szenario (Temperaturanstieg bis 2050 kleiner gleich 2 K) mit dem 6DS-Szenario (Temperaturanstieg im Bereich von 6 K) verglichen. Das 6DS Szenario stellt den Weg dar, der beschritten wird, wenn international keine weiteren Maßnahmen zum Klimaschutz ergriffen werden, und eignet sich daher als Referenz. Für die Bereiche „space heating and cooling“ und „water heating“ wurde das Marktpotenzial wie in Tab. 6-2 dargestellt abgeschätzt.

Tab. 6-2 Analyse des globalen Marktpotenzials für das Technologiefeld Energieeffiziente Gebäude und Gebäudetechnik

Jahr	Ausgangswert für Referenz (6DS-Szenario)	Marktpotenzial anhand 2DS-Szenario	Szenarienbereich INT_besser_2°C
Einheit	TWh/a	TWh/a	TWh/a
2020	20.300	1.100	#NV
2030	22.600	3.400	#NV
2040	24.500	5.300	#NV
2050	26.800	7.500	#NV
#NV: nicht vorhanden			

Der Verlauf des gesamten Endenergiebedarfs in Gebäuden ist für die beiden Szenarien in Abb. 6-4 (links) dargestellt. Die Differenz ist überdies nach den verschiedenen Anwendungsbereichen aufgefächert. Weiterhin ist in Abb. 6-4 (rechts) die Energieeinsparung in EJ in den national betrachteten Anwendungen dargestellt.

Im Gegensatz zur nationalen Betrachtung ist erkenntlich, dass selbst mit maximalem Einsatz von Klimaschutzmaßnahmen weltweit keine Reduktion, sondern lediglich ein konstanter Bedarf an Endenergie erzielt werden kann. Eine Reduktion von THG-Emissionen auf internationaler Skala ist damit zwingend mit einer Reduktion des Gesamtemissionsfaktors, also dem weltweiten Umstieg auf Erneuerbare Energien, verbunden.

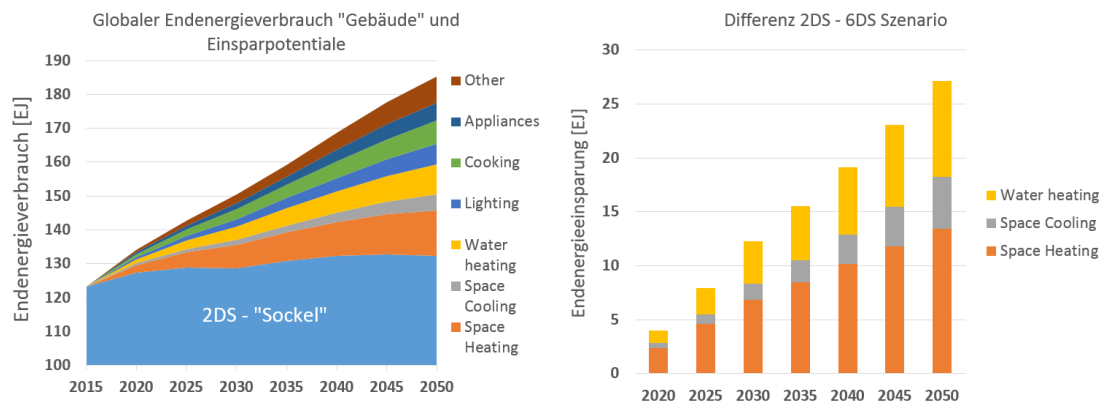


Abb. 6-4 Entwicklung der verwendeten Endenergie im Technologiefeld Energieeffiziente Gebäude und Gebäudetechnik

Verifizierung mittels Analyse der implizierten Wachstumsraten

Unter Verwendung der Analyse der impliziten Wachstumsraten wurden in Bezug auf des Referenzjahr 1996 folgende nationalen CAGR-Werte (continuous annual growth rates) berechnet:

$CAGR(2014,2050)_{DE_80\%} = 2,3\% \text{ p. a.}$

$CAGR(2014,2050)_{DE_95\%} = 2,4\% \text{ p. a.}$

Die Resultate sind konsistent zu den auf Basis des Gebäudebestands errechneten Sanierungsraten.

Für die internationalen Werte wurde die Einsparung im Vergleich zu einer Extrapolation des Trends der 2000er-Jahre bestimmt. Damit ergibt sich:

$CAGR(2014,2050)_{INT_2DS} = 8,9\% \text{ p. a.}$

Im internationalen Bereich ist damit eine deutlich höhere energetische Sanierung zum Erreichen des 2 °C-Ziels notwendig.

6.2 Kriterium 4: Beitrag zu Klimazielen und weiteren Emissionsminderungszielen

Die Berechnung der Treibhausgaseinsparung nimmt die Endenergieeinsparung unter Kriterium 3 als Grundlage. Zur Ermittlung der damit verbundenen eingesparten $CO_2\text{-}\ddot{a}q$ Emissionen wurden neben Stromerzeugungsszenarien (ISE 2013; IWU 2015; Öko-Institut 2015) auch entsprechende Warmwasser- und Wärmeerzeugungsszenarien (DLR 2012) für die Jahre 2020 – 2050 verwendet, da die vermiedenen THG-Emissionen entscheidend vom in der Zukunft verwendeten Strom- und Wärmemix abhängen.

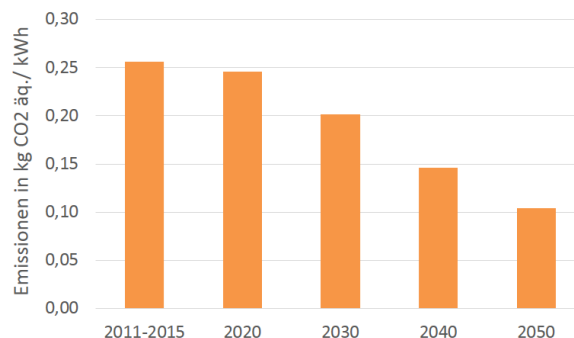
Unter Verwendung der ökologischen Einzelwerte der verwendeten Energieträger (UBA 2014) ergeben sich die jährlich vermiedenen Treibhausgas-Emissionen des Technologiefelds wie in Tab. 6-3 dargestellt.

Tab. 6-3 Jährlich vermiedene Treibhausgas-Emissionen durch Anwendungsbereich Gebäudehülle in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall

Bezugsjahr	Szenarienbereich DE_80 %	Szenarienbereich DE_95 %
	(Mio. t CO ₂ -äq.)	(Mio. t CO ₂ -äq.)
2020	21 – 25	21 – 28
2030	51 – 65	51 – 75
2040	81 – 105	81 – 108
2050	101 – 125	131 – 132

Anmerkung: Es werden die vermiedenen Emissionen im Bezugsjahr dargestellt, nicht die kumulierten vermiedenen Emissionen bis zum Bezugsjahr.

Zusätzlich zu der Endenergieeinsparung ist eine drastische Verringerung des durchschnittlichen Gesamtemissionsfaktors notwendig. In Abb. 6-5 ist dessen Veränderung dargestellt. Als Datengrundlage wurde das Szenario „Basis“ der Leitstudie des DLR (DLR 2012) verwendet. Es muss bemerkt werden, dass die Werte eine beachtliche Bandbreite aufweisen. Zur Veranschaulichung wurde daher für das Jahr 2050 die Bandbreite des durchschnittlichen Gesamtemissionsfaktors für die Szenarien KS80 und KS95 als schwarzer bzw. roter Balken abgebildet (DLR 2012; Öko-Institut 2015).

**Abb. 6-5** Durchschnittlicher Gesamtemissionsfaktor für die Szenarien KS80 und KS95 für den Zeitraum 2011 - 2050

Die sich daraus ergebenden CO₂-äquivalenten Emissionen privater Haushalte sind in Abb. 6-6 dargestellt. Da die eingesparte Endenergie für beide Szenarien im Mittel sehr ähnlich ist, werden Unterschiede im Wesentlichen durch entsprechende CO₂-Gesamtemissionsfaktoren abgebildet. So kann der für das KS95 vorgegebene Zielwert von 10 Mio. t CO₂-äq. nur mit einem durchschnittlichen Emissionsfaktor von 0,04 kg CO₂-äq./kWh erreicht werden. Das bedeutet, dass Strom und Wärme für diesen Fall zu fast 100 % aus regenerativen Energien erzeugt werden muss.

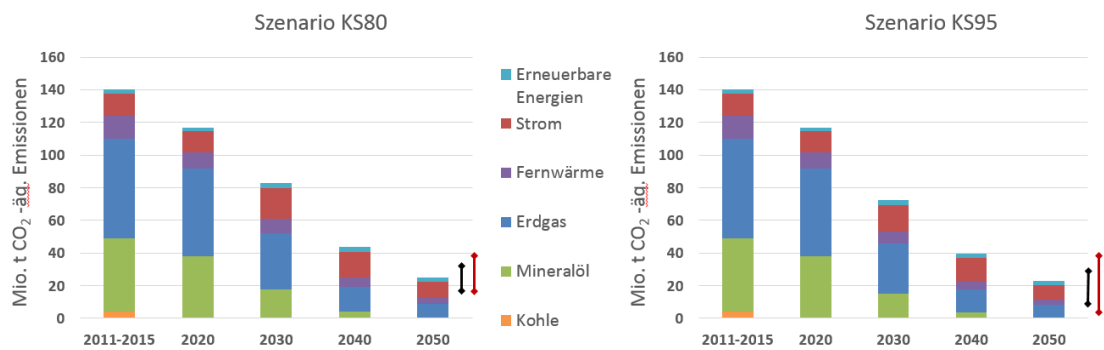


Abb. 6-6 THG-Emissionen privater Haushalte Deutschlands für die Szenarien KS80 und KS95

In der Abbildung sind weiterhin die Bandbreiten eingezeichnet, die sich nun aus den Spannweiten in Endenergiebedarf und Gesamtemissionsfaktoren zusammensetzen.

6.3 Kriterium 5: Beitrag zur Energie- und Ressourceneffizienz

Die mögliche Primärenergieeinsparung des Technologiefeldes Energieeffiziente Gebäude und Gebäudetechnik wird aus Kriterium 3 unter Einbeziehung der Primärenergiefaktoren (BMWi 2015) abgeleitet und ist in Tab. 6-4 dargestellt.

Tab. 6-4 Jährlich vermiedener Primärenergieeinsatz durch Anwendungsbereich Gebäudehülle in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall

Bezugsjahr	Szenarienbereich DE_80 %	Szenarienbereich DE_95 %
	(PJ/a)	(PJ/a)
2020	389 – 435	405 – 418
2030	806 – 1.060	1.052 – 1.099
2040	1.394 – 1.554	1.427 – 1.630
2050	1.599 – 1.797	1.652 – 1.806

Anmerkung: Es wird der vermiedene Primärenergieeinsatz im Bezugsjahr dargestellt, nicht der kumulierte vermiedene Primärenergieeinsatz bis zum Bezugsjahr.

6.4 Kriterium 6: Kosteneffizienz

Durch die eingesparten CO₂-Emissionen kann anhand der CO₂-Zertifikatepreise, die für die Klimaschuttszenarien variieren (Öko-Institut 2015), die Kosteneffizienz des Anwendungsbereiches Energieeffiziente Gebäude und Gebäudetechnik **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** bewertet werden. Die Kosteneinsparpotenziale sind in Tab. 6-5 aufgeführt.

Tab. 6-5 Jährliche direkte und indirekte Kosteneinsparpotenziale (oder Mehrkosten) durch Anwendungsbereich Gebäudehülle in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall

Bezugsjahr	Szenarienbereich DE_80 % (Mrd. € ₂₀₁₅)*	Szenarienbereich DE_95 % (Mrd. € ₂₀₁₅)*
2020	0,5 – 0,6	0,6 – 0,8
2030	2,6 – 3,3	4,5 – 6,5
2040	7,3 – 9,4	11,6 – 15,5
2050	13,1 – 16,2	26,2 – 26,4

*) nicht abgezinst auf ein Basisjahr

6.5 Kriterium 7: Inländische Wertschöpfung

Die Quantifizierung der inländischen Wertschöpfung gestaltet sich in einer komplexen und tiefgestaffelten Wertschöpfungskette schwierig und ist abhängig von den angenommenen Systemgrenzen. So kommen vorhandene Studien auch zu ganz unterschiedlichen Werten. Es lässt sich aber übergreifend qualitativ feststellen, dass die Baubranche zu einer der bedeutendsten Wirtschaftszweige hinsichtlich Wertschöpfung in unser Gesellschaft zählt.

In Deutschland beträgt das Volumen des Renovierungsmarktes nach einer aktuellen Studie rund 115 Mrd. Euro und ist damit mehr als zweimal so groß wie das des Neubausektors mit 50 Mrd. Euro (Roland Berger GmbH und UniCredit Bank AG 2016). Eine erweiterte Betrachtung der Wertschöpfungskette im Bauwesen zeigt, dass sich bei Einbeziehung von baurelevanten Leistungen deutlich größere Produktionswerte ergeben. Rund jeder Zehnte Sozialversicherungspflichtige ist in der Wertschöpfungskette Bau beschäftigt. So zeigt die Studie „Wertschöpfungskette Bau“, dass sich Stand 2008 insgesamt ein Volumen von 443 Mrd. Euro ergibt - entsprechend 11 % des gesamtwirtschaftlichen Produktionswertes (IW Consult 2008). Davon entfallen zwei Fünftel des Wertes auf das Baugewerbe und ein Viertel auf rohstoffnahe Branchen und industrielle Vorleister. Damit wird deutlich, dass in erheblichem Umfang baurelevante Leistungen außerhalb des Baugewerbes erbracht werden. Hier ist vor allem die Dienstleistungsbranche zu nennen. Diese trägt mit 4,1 Prozentpunkten zu den 11 % gesamtwirtschaftlicher Wertschöpfung bei. Bei den baurelevanten Lieferungen nehmen Planungs-, Beratungs- und Genehmigungstätigkeiten ein Viertel der Leistungen ein. Beispielsweise erwirtschaften Architektur- und Ingenieurbüros 90 % ihrer Umsätze in der Bauproduktion. Laut einer aktuellen Arbeitsmarkstudie wird ein Anstieg der Erwerbstätigen in Architektur- und Ingenieurbüros von 560.000 in 2010 auf 669.000 in 2030 erwartet (BMAS 2013).

Der Bundesverband deutscher Wohnungs- und Immobilienunternehmen führt an, dass mit einer Bruttowertschöpfung von 299 Mrd. Euro der Kernbereich der Immobilienwirtschaft zu den bedeutendsten Branchen in Deutschland zählt (GDW 2014).

Das Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW) und das Deutsche Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) geben in ihren Berichten das inländische Wertschöpfungspotential in Bezug auf die energetische Sanierung von Wohngebäuden an (DIW 2014; IÖW 2014). Das DIW weist ein jährliches energiebedingtes Investitionspotential von 7,4 Mrd. Euro für das Jahr 2020 aus, das bis zum Jahr 2050 auf 14 Mrd. Euro steigt. Bei einer Betrachtung der Vollkosten muss man in der Mehrzahl der Fälle die sogenannten Ohnehin-Kosten, d. h. Kosten für eine ohnehin notwendige Gesamtanierung, dazu addieren. Unter der Annahme, dass die energiespezifischen Kosten 30 % der Vollkosten ausmachen, ergibt sich ein Investitionsvolumen von 25 Mrd. Euro im Jahr 2020, das auf 47 Mrd. Euro im Jahr 2050 ansteigt. Im Mittel wären dies 36 Mrd. Euro.

Das IÖW stellt fest, dass die energetische Gebäudesanierung im Jahr 2011 eine Wertschöpfungseffekte von knapp 14 Mrd. Euro generierte und dieser 278.000 Vollzeit Arbeitsplätze zuordenbar waren. Berücksichtigt wurden bei der Betrachtung der Wertschöpfungskette Handwerker und Planer aber auch Vorleistungslieferanten, z. B. Materialhersteller. Das Institut geht davon aus, dass die inländische Wertschöpfung im Jahr 2020 zunächst auf rund 12 Mrd. Euro ansteigt und dann auf 9,4 Mrd. Euro im Jahr 2030 zurückfällt. Unter der erweiterten Vollkostenbetrachtung würde sich die Wertschöpfung im Mittel im betrachteten Zeitraum um die 31 Mrd. Euro bewegen.

Zum Vergleich ergeben sich aus der Analyse der Daten in der BMWi-Broschüre „Energieeffizienzstrategie Gebäude“ durchschnittliche jährliche Vollkosten für die Investition in Gebäudehülle und Heizungsanlage in Höhe von 28 Mrd. bis 40 Mrd. Euro - je nach gewähltem Zielszenario (BMWi 2015). Damit ergibt sich im Überblick eine Bandbreite von (34 ± 6) Mrd. Euro für das konstante jährliche inländische Wertschöpfungspotenzial.

Diskutiert man die Anteile der unterschiedlichen Anwendungsbereiche an den Wertschöpfungspotentialen, so gilt pauschal, dass im Wohnungsbau rund 20 % bis 25 % der Wertschöpfung auf den Bereich der Gebäudesystemtechnik fällt und ein Großteil auf den investitionsintensiven Bereich der Gebäudehülle (IÖW 2014; BMUB 2015). Für Bürobauten mit einem höheren Installationsgrad ist tendenziell ein höherer Anteil für die Gebäudesystemtechnik von bis zu 40 % anzunehmen.

Weltweit betrugen 2011 die Investitionen für Energieeffizienzmaßnahmen im Gebäudebereich 48,7 Mrd. Euro (adelphi und Borderstep 2013). Diese werden sich nach Schätzungen auf 74 Mrd. Euro bis 2017 erhöht haben, was einer durchschnittlichen Wachstumsrate von 7 % entspricht. Deutsche Unternehmen profitieren von der Innovationskraft und der Wertigkeit ihrer Produkte. Allerdings drängen zunehmend auch preisgünstige Produkte aus Schwellenländern in den internationalen Markt. Der weltweite Markt lässt sich zu über 75 % 5 Ländern zuordnen: USA, Deutschland, Frankreich, Großbritannien und China. Für deutsche Unternehmen ist vor allem der europäische Markt von Interesse. So ist in Frankreich ein Investitionsvolumen für die energetische Gebäudesanierung bis 2020 von rund 192 Mrd. Euro vorhanden. Auch der russische Markt ist für deutsche Unternehmen aufgrund Ihrer guten Positionierung interessant (adelphi und Borderstep 2013).

6.6 Kriterium 8: Stand und Trends von F&E im internationalen Vergleich

Teilkriterium 8.1 Internationale Aufstellung der deutschen Industrie und Teilkriterium 8.2 F&E-Budgets

Die Ad-hoc Industrial Advisory Group weist in seiner FuE Roadmap auf die Notwendigkeit von Wärmedämm Lösungen hin, die gerade für die Altbausanierung geeignet sind (Group 2010). Es werden langlebige, hochleistungsfähige und schlanke Wärmedämmpaneele benötigt, die eine ästhetische und wirtschaftliche Fassadengestaltung ermöglichen. Eine weitere Priorität wird der multifunktionalen Gebäudehülle zugemessen, insbesondere den Themen Gebäudeintegrierte Photovoltaik sowie Fassadenbelüftung in Kombination mit solarthermischen Komponenten für die Wärme- und Kältebereitstellung. Im Anwendungsbereich Gebäudesystemtechnik werden auf europäischer Ebene innovative energieeffiziente Niedrigexergie Heiz- und Kühlkonzepte zur Erschließung von Umweltenergiequellen gefordert. Dabei spielen Wärmepumpen und Wärmespeicher eine besondere Rolle. Im Fokus stehen ebenso passive Systeme als Ersatz für konventionelle Lüftungs- und Kühlkonzepte und innovative Lösungen im Bereich der Steuer- und Regelung bzw. Automation unter Einbeziehung des Nutzers. Im Anwendungsbereich Gebäudeplanung und Betrieb stellt die Ad-hoc Industrial Advisory Group Themen, wie Industrialisierung von Prozessen und Massenfertigung, Life Cycle Assessment, Informationsmanagement und Standardisierung, Diagnosewerkzeuge und vorausschauende Wartung als FuE-Herausforderungen der Zukunft dar.

Zur Bewertung des Standes von Forschung und Entwicklung sind in Tab. 6-6 die Forschungs- und Entwicklungsbudgets, deren zeitliche Entwicklung und Anteil am gesamten Energieforschungsbudget für Deutschland und weitere Länder dargestellt.

Die IEA führt in ihrer Technology Roadmap für energieeffiziente Gebäudehülle folgende langfristig notwendigen Technologien auf: Hochleistungswärmedämmungen, wärmereflektierende Oberflächen, hochisolierende Verglasungen, adaptive Verglasungen (IEA 2012). Die International Energy Agency hat in ihrer 2011 veröffentlichten Technology Roadmap in Bezug auf HLK-Technologien (IEA 2011) wichtigen Aktionsfelder für die nächsten 10 Jahre herausgehoben. Im Bereich der aktiven solarthermischen Systeme: Solare Kühlsysteme, kompakte und kostengünstige Wärmespeicher, intelligente Steuer- und Regelsysteme, Optimierung der Herstellungsprozesse. Im Bereich der KWK-Technologien: hinsichtlich Effizienz und Emissionen optimierte Kolbenmaschinen, hinsichtlich Effizienz, Emissionen und Kosten optimierte Mikroturbinen, Gasturbinen, Sterling-Motoren, hinsichtlich der Kosten, Lebensdauer optimierte Brennstoffzellen. Für Wärmepumpen sind z. B. die Optimierung der Systemintegration, die Entwicklung intelligenter Regelungs- und Steuerungsstrategien, die Verbesserung der Kommunikation mit dem Gebäudemanagementsystem und dem Smart Grid und die Entwicklung von integrierten und hybriden Systemen wichtige FuE-Ziele.

Im Bereich der Wärmespeicherung wird FuE Bedarf für Phasenwechselmaterialien, Stabilität von Materialien und Systemkomponenten, Analyse der systemspezifischen Speicherkomponenten, optimierte Steuerung und Systemeinbindung und Hochtemperatur-Wärmespeicher angezeigt.

Tab. 6-6 Bewertung des Standes von Forschung und Entwicklung für das Technologiefeld Energieeffiziente Gebäude und Gebäudetechnik – Input-Orientierung

	Einheit	Wert
Entwicklung des öffentlichen F&E-Budgets auf Bundesebene - Deutschland		
Absolutangabe der öffentlichen F&E-Förderung Status Quo (2015)	€	30,9 Mio.
Zeitlicher Trend (Veränderung über die letzten 10 Jahre)	+ €/a (%/a)	1,7 Mio 5,6
Gesamtes öffentliches Energie-F&E-Budget nach IEA Status Quo (2015)	€	864 Mio.
Relativer Anteil am gesamten öffentlichen Energie-F&E-Budget nach IEA Status Quo (2014)	%	3,6
Zeitlicher Trend (Veränderung über die letzten 10 Jahre)	+ %/a	-0,01
Entwicklung des öffentlichen F&E-Budgets im internationalen Vergleich		
<i>Vereinigte Staaten von Amerika</i>		
Absolutangabe der öffentlichen F&E-Förderung Status Quo (2015)	€	95,7 Mio.
Zeitlicher Trend (Veränderung über die letzten 10 Jahre)	+ €/a + %/a	5,7 Mio. 6,0
Gesamtes öffentliches Energie-F&E-Budget nach IEA Status Quo (2015)	€	5535 Mio.
Relativer Anteil am gesamten öffentlichen Energie-F&E-Budget nach IEA	%	1,7
Zeitlicher Trend (Veränderung über die letzten 10 Jahre)	+ %/a	0,06
<i>Frankreich</i>		
Absolutangabe der öffentlichen F&E-Förderung der jeweiligen Technologie Status Quo (2014)	€	33,0 Mio.
Zeitlicher Trend (Veränderung über die letzten 10 Jahre)	+ €/a + %/a	2,2 Mio. 6,7
Gesamtes öffentliches Energie-F&E-Budget nach IEA Status Quo (2013)	€	1092 Mio.
Relativer Anteil am gesamten öffentlichen Energie-F&E-Budget nach IEA	%	3,1
Zeitlicher Trend (Veränderung über die letzten 10 Jahre)	+ %/a	0,20

In der Schweiz werden im Bereich der Gebäudehüllentechnologien mittel- und langfristig Hochleistungswärmedämmungen (z. B. VIP, Aerogel), schaltbare Verglasungen und multifunktionale Fassaden als priorisierte FuE-Themen aufgeführt (SCCR 2015). Im Bereich der Gebäudesystemtechnik stehen u. a. Gebäudeenergiemanagement, z. B. ein Management unter Einbeziehung des Gebäude- und des Nutzerverhaltens, innovative Beleuchtungssysteme und eine höhere, architekturverträgliche Integration von Erneuerbaren Energien in Gebäude im strategischen FuE-Fokus.

In den USA besteht der höchstpriorisierte FuE-Fokus auf hochisolierenden Verglasungen mit vergleichbaren Verglasungsstärken und Gewicht wie der Verglasungsbestand. Um Sanierungen einfacher zu ermöglichen, werden zudem schlanke und dauerhaft stabile Hochleistungswärmedämmungen sowie Technologien zur Verbesserung der Luftdichtheit von Gebäudehüllen als förderwürdig angesehen (Sawyer 2014). Im Bereich der Gebäudesystemtechnik werden neben Beleuchtungstechnologien (O)LED im Bereich der HLK-Systeme werden u.a. kosten- u. energieeffiziente Wärmepumpensysteme und nicht gasgetriebene Kompressorsysteme zur Kältebe-

reitestellung als Entwicklungsfelder gesehen. Ebenso wichtig sind Aktivitäten zur Koordination der optimalen Einbindung von Gebäuden in das allgemeine Energieversorgungssystem.

In China werden in langfristigen FuE-Strategien ebenfalls Hochleistungswärmedämmungen, die Integration von Wärmespeichermaterialien (PCM) in Fassaden, Wärmestrahlungsbarrieren, ‚Kühle‘ Wandfarben, energieeffiziente Fenster (z. B. Vakuumverglasung, Rahmen, wetteradaptive Verschattungssysteme) erwähnt (Yu 2010). Im Gebäudesystemtechnikbereich werden notwendige FuE-Aktivitäten bei O(LED), solargestützten Wärmepumpensysteme, kombinierte solare Wärme-, Kälte- und Warmwasserbereitstellung und BIPV hervorgehoben. Für urbane dezentrale Energie werden dort Themen wie Data Mining, Modellierung und Simulation als wichtig erachtet.

In Indien sind in einer Studie des Department of Energy (DoE) die Integration von Wärmespeichermaterialien in die Gebäudehülle, ‚Kühle‘ Dächer, gebäudeintegrierte aktive Solarsysteme (elektrisch und thermisch) sowie Fassaden- und Dachbegrünungen als FuE-Themen genannt (Yu 2010). Im Anwendungsbereich Gebäudesystemtechnik spielen bei FuE-Anstrengungen innovative Beleuchtungssysteme (O(LED)), Wärmespeicher (z. B. Phasenwechselmaterialien), innovative solarangetriebene Kühlsysteme und solarthermische Anwendungen eine zentrale Rolle.

Tab. 6-7 Internationale Aufstellung der deutschen Industrie hinsichtlich des Technologiefelds Energieeffiziente Gebäude und Gebäudetechnik

Welchen Status hat die deutsche Industrie hinsichtlich Know-how innerhalb dieses Anwendungsbereiches weltweit?

Anwendungsbereich <input checked="" type="checkbox"/> Technologieführerschaft	<input checked="" type="checkbox"/> wettbewerbsfähig
<input type="checkbox"/> nur in Einzelanwendungen konkurrenzfähig	<input type="checkbox"/> abgeschlagen

Teilkriterium 8.3 F&E-Outputs

Die wissenschaftliche Leistung in Deutschland für das Technologiefeld Energie- und Ressourceneffiziente Gebäude und Quartiere wurde anhand einer SCOPUS-Literaturrecherche dargestellt (Abb. 6-7). Dabei wurden vereinfacht die Suchbegriffe „Energy“ und „Building“ verwendet. Dabei ist zu beachten, dass es eine Vielzahl von akademischen Publikationen mit einem Impact auf das Technologiefeld Energieeffiziente Gebäude gibt, die nicht unter diesen Stichworten geführt werden, so z. B. Forschungs- und Entwicklungsleistungen aus den Bereichen der Material- und Naturwissenschaften, die einen höheren Grundlagenbezug aufweisen. 2016 war der Publikationsanteil von Forschern in Deutschland (Affiliation in Deutschland) rund 5 %. Der Hauptanteil der Publikationen stammt dabei aus den USA, gefolgt von China.

In Bezug auf die Anmeldung von gewerblichen Schutzrechten in dem Bereich Energieeffiziente Gebäude wurden die internationalen Suchbegriffe verwendet, die dem deutschen Begriff „Passivhaus“ zugeordnet werden konnten. Hier zeigt sich, dass sowohl die Anzahl als auch der Zuwachs an Patentanmeldungen in Deutschland im internationalen Vergleich nicht in der Spitzengruppe liegt (Abb. 6-8). USA und China zeigen hier eine höhere Dynamik, wobei die Anzahl der Patentanmeldungen in China

um ca. einen Faktor 10 höher ist als dies in Deutschland der Fall ist. Verwendet wurden Suchbegriffe, die dem Begriff „Passivhaus“ untergeordnet werden können.

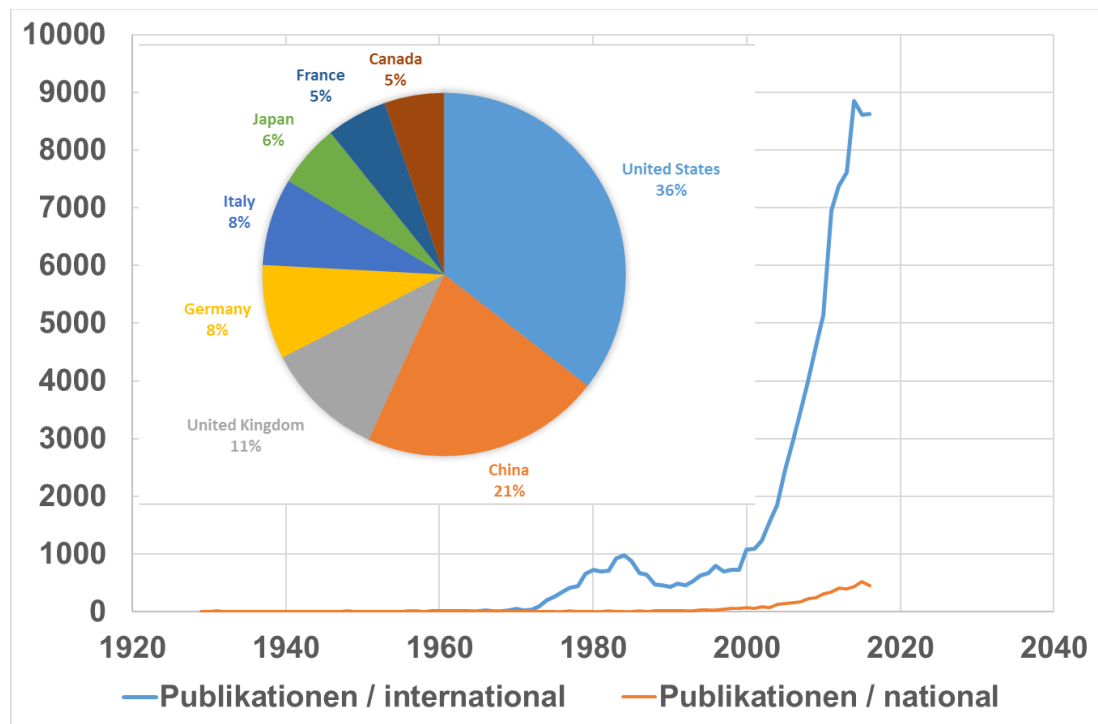


Abb. 6-7 Scopus Recherche zu Publikationen mit dem Stichwort „Energy“ und „Building“ und prozentuale Zuordnung dieser Publikationen auf Länder

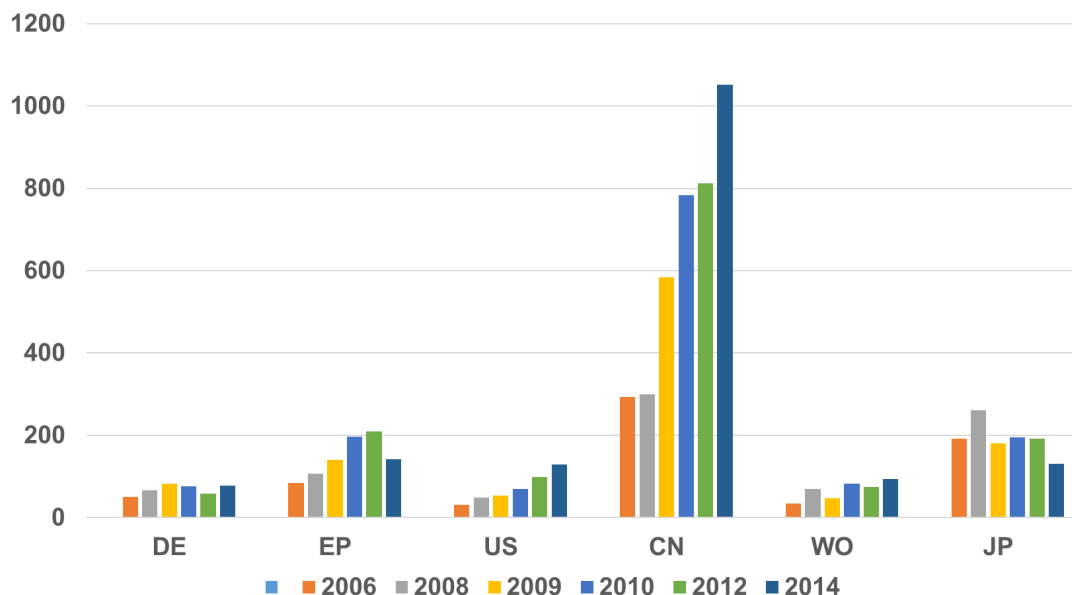


Abb. 6-8 Patentanalyse; Vergleich der Anmeldungen in Deutschland (DE), Europa (EP), Amerika (US), China (CN), Japan (JP) und der Welt (WO) zu dem Themenfeld energieeffiziente Gebäude

Tab. 6-8 zeigt nun die Bewertung von Stand und Trends der Forschung und Entwicklung an Hand der akademischen Publikationen und der Patentanmeldungen.

Tab. 6-8 Bewertung von Stand und Trends der Forschung und Entwicklung für das Technologiefeld Energieeffiziente Gebäude und Gebäudetechnik – Output-Orientierung

	Einheit	Wert
Akademische Publikationen als Forschungsindikator		
Relativer Anteil der in Deutschland geschriebenen Publikationen am weltweiten Aufkommen beim Status Quo (2016)	%	5.3
Zeitlicher Trend (über mindestens die letzten 5 Jahre)	%/a	33
Patente als Entwicklungsindikator		
Relativer Anteil der von deutschen Firmen/Privatpersonen und Institutionen eingereichten Patente am weltweiten Aufkommen beim Status Quo (2014)	%	5
Zeitlicher Trend (über mindestens die letzten 5 Jahre)	%/a	20

In einer Studie des BMVBS zu Indikatoren zur Innovationstätigkeit am Bau wurden insbesondere auch die Patentaktivitäten in den Bereichen „Klimaschutz“ (hierunter fallen z. B. die Themen Heizen, Kühlen, Belüften) und Energieeffizienz (hierunter fallen z. B. die Wärmedämmung) in Gebäuden im internationalen Vergleich untersucht (BMVBS 2013). Analysiert wurden unter anderem 519 deutsche Patentanmeldungen, die in dem Untersuchungszeitraum von 2005 bis 2012 in diesen Bereichen am Europäischen Patentamt (EPO) getätigt wurden. Die inhaltliche Zuordnung zu einzelnen Technologiegruppen ist in Abb. 6-9 zu sehen.

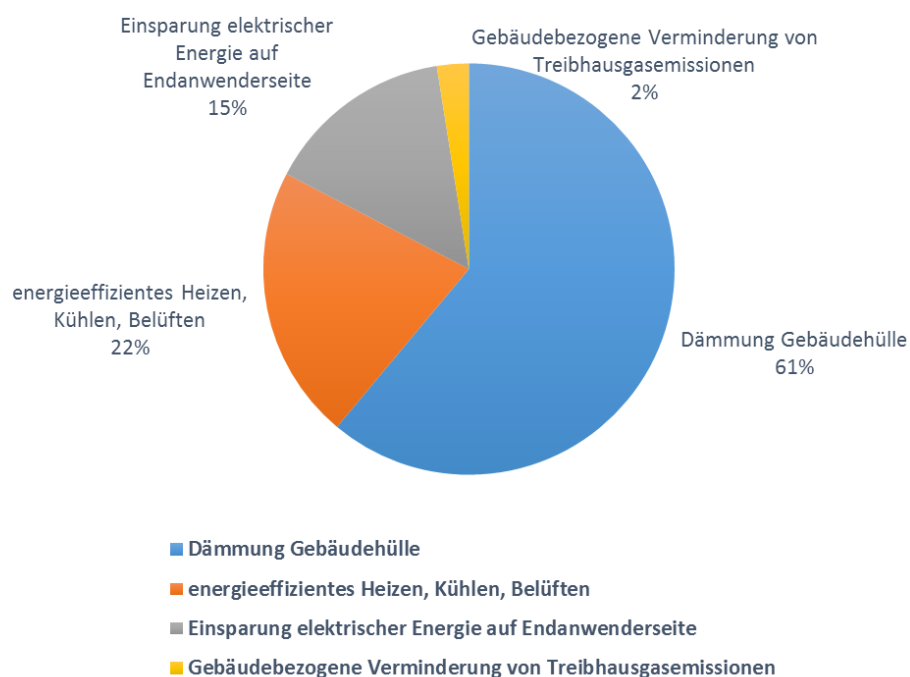


Abb. 6-9 Zuordnung der Patentanmeldungen am europäischen Patentamt zu Technologiegruppen

Laut BMVBS weist Deutschland vor allen Dingen im Bereich Energieeffizienz in Gebäuden Spezialisierungsvorteile auf. Rund 24 % der Anmeldungen am EPO entfallen auf Erfindungen aus Deutschland. Weitere Einzelfelder, auf die sich deutsche Anmelder spezialisiert haben, sind Verfahren und Materialien zur Dämmung der Gebäudehülle und im Technikfeld des energieeffizienten Heizens, Kühlens und Lüftens. Ein Vergleich zwischen Deutschland und USA/Japan in der Gewichtung der beiden Bereiche Energieeffizienz und Klimaschutz zeigt, dass in den USA wie in Japan im umgekehrten Verhältnis der Schwerpunkt in den gebäudebezogenen Klimaschutztechnologien liegt (USA 60,9 % Japan 93,8 %), wobei hier der elektrotechnisch/elektronisch orientierte Technikbereich heraussticht.

Damit kommt das BMVBS zu dem Schluss, dass die deutschen Patentaktivitäten im internationalen Vergleich eine starke bis herausragende Rolle einnehmen. Es wird zudem eine geringe Beteiligung der Hochschulen und Forschungseinrichtungen bei den Patentaktivitäten für den betrachteten Zeitraum festgestellt. Die Anmeldeaktivitäten der unterschiedlichen Akteure (Forschung und Industrie, Bauwirtschaft, Zulieferer, Planer) zeigt auch, dass die Bauunternehmen mit ihren geringen Patentaktivitäten als Technikintegratoren zu verstehen sind und die Hauptaktivität von der bau-spezifischen Zulieferindustrie ausgeht. Insofern wird hier deutlich, dass für die Implementierung von Innovationen die gesamte Wertschöpfungskette relevant ist und für eine Beschleunigung von Innovationsprozessen die einzelnen Akteure besser zu vernetzen sind, und dies sowohl in der Vertikalen entlang der Wertschöpfungskette als auch zwischen den unterschiedlichen gebäudebezogenen Anwendungsbereichen, wie Gebäudehülle, Bautechnik oder Gebäudesystemtechnik.

6.7 Kriterium 9: Gesellschaftliche Akzeptanz

Die Notwendigkeit zur Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden findet in der Gesellschaft eine breite Zustimmung. Effizienztechnologien werden vor allem mit folgenden Erwartungen verknüpft: Einsparung von Energie, d. h. Reduzierung der Betriebskosten, Klimaschutz und Steigerung des Wohnkomforts (Hacke und Lohmann 2007; Haug und Vernim 2014).

In Bezug auf die Sanierung von Wohngebäuden werden als wesentliche allgemeine Hemmnisse das geringe Interesse und Engagement der Gebäudebesitzer sich zu informieren und Maßnahmen umzusetzen, die Unwissenheit, Vorurteile und Verunsicherung bezüglich der technischen Umsetzung und des zu erwartenden Ergebnisses, und schließlich die Unsicherheit bezüglich der Wirtschaftlichkeit der Maßnahme genannt. Weiterhin bestehen teilweise Bedenken, dass sich mit einer Sanierungsmaßnahme das architektonische Erscheinungsbild von Gebäuden negativ ändert. (Weiß und Dunkelberg 2010; vbw 2012).

Die unterschiedlichen Technologiegruppen sind hinsichtlich der gesellschaftlichen Akzeptanz differenziert zu betrachten.

Technik im Bereich der Gebäudehülle ist oftmals sichtbar und muss daher den technischen und ästhetischen Ansprüchen von Bauherren, Architekten und genehmigenden Behörden genügen. Innovationen sollten hier idealerweise den Planenden große Freiheiten in Bezug auf die architektonische Gestaltung der Gebäudehüllen eröffnen. So sind bei Wärmedämmungen schlanke Systeme mit hoher Dämmwirkung von Vor-

teil. In diesem Zusammenhang kommt auch der Eigenschaften Nichtbrennbarkeit und Wiederverwertung eine besondere Bedeutung zu (Kienzlein et al. 2014). Für gebäudeintegrierte Photovoltaik und Solarthermie ist die Frage der architektonischen Gestaltung wesentlich.

Im Bereich der Gebäudesystemtechnik sind aus Sicht der Nutzer sichtbare, störanfällige oder technisch aufwendige Installationen oder Systeme zu vermeiden und eine funktionelle Bedienschnittstelle notwendig um die Akzeptanz zu fördern. Bei der Implementierung von Lüftungsanlagen stellen stetig steigende Anforderungen an Brandschutz, Bedenken bzgl. Hygiene und nicht bedarfsgerechte Betriebszustände Hemmnisse dar. Generell ist die gesellschaftliche Akzeptanz von energieeffizienter Gebäudesystemtechnik hoch und von der Tendenz her steigend. Aber auch die Themen Nachhaltigkeit und Rezyklierbarkeit der eingesetzten Materialien rücken zunehmend in den Fokus der Endverbraucher.

Allgemein ist eine FuE-begleitende Akzeptanzanalyse sinnvoll, um kundenorientierte Produkte zu generieren. Ebenso ist die Bereitstellung und Vermittlung von Information für Stakeholder wesentlich, um bestehende Vorurteile auszuräumen und die Erwartungen auf die technischen Möglichkeiten einer neuen Technologie abzugleichen (PTJ 2015). In FuE-begleitenden Demonstrationsprojekten ist neben der wissenschaftlich-technischen Evaluierung, eine optimale Informationsvermittlung und -verbreitung wichtig (Wortmann 2010).

Tab. 6-9 Bewertungsraster für die Akzeptanz von das Technologiefeld Energieeffiziente Gebäude und Gebäudetechnik zum Status Quo (2015)

Anwendungsbereich	Ebene Markt	Ebene Gesellschaft	Lokale Ebene
	Marktakzeptanz	Sozialpol. Akzeptanz	Lokale Akzeptanz
	Kunden, Haushalte, Nutzer, Industrie: Wie viel investieren Marktakteure?	Sozio-politische Entwicklungen, gesellschaftliche Stimmung / Diskurse; Image	Lokale Konflikte, Klagen, Aktivitäten von Bürgerenergie
Gebäudehülle und Bautechnik	Hoch	ambivalent	Nicht relevant
Gebäudesystemtechnik	Hoch	ambivalent	Nicht relevant
Planung und Gebäudebetrieb	Hoch	ambivalent	Nicht relevant

7 F&E-Empfehlungen für die öffentliche Hand

7.1 Übergreifende Aspekte

Die Evaluierung einzelner Technologien im Bereich energie- und ressourceneffiziente Gebäude führen im Folgenden zu F&E-Empfehlungen für diese Technologien. Im Anwendungsbereich Planen und Gebäudebetrieb werden F&E-Empfehlungen auch für Themen abgegeben, die das Gebäude als Gesamtsystem betrachten. Diese Empfehlungen zielen auf die Optimierung von Planungsprozessen und den Gebäudebetrieb ab. Für eine weitgehende Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden müssen mögliche Synergieeffekte bei der Entwicklung von Einzeltechnologien mit anderen relevanten Gebäudekomponenten bereits in einer frühen F&E-Phase erkannt und berücksichtigt werden. Ein Beispiel sind aktive Fassadenkomponenten, die Wärme bereitstellen, und mit der Gebäudesystemtechnik vernetzt werden müssen. Für die Hebung von Synergiepotentialen und zur Beschleunigung von Entwicklungspfaden wird daher empfohlen:

- Werkzeuge zur gesamtheitlichen Bewertung von Maßnahmenpakete auf unterschiedlichen Einsatzebenen (Gebäude, Quartier) zu entwickeln,
- Entwicklungen frühzeitig in Living Lab Umgebungen zu evaluieren und zu optimieren,
- die Interdisziplinarität in F&E Projekten zu steigern, um eine optimale Einbindung der Entwicklung in das System Gebäude oder Quartier zu gewährleisten,
- die Durchführung von Fallstudien mit anschließenden Monitoring auf Gebäude und Quartiersebene um die bestehende Lücke von FuE und realen Bauen zu schließen.

Gleichermaßen wichtig ist die begleitende Betrachtung von Ökologie, Ökonomie und Akzeptanz bei Technologieentwicklungen.

Da der Hauptanteil der möglichen Endenergieeinsparung über Sanierungsmaßnahmen realisiert werden muss (die Neubaurate ist vergleichsweise vernachlässigbar), ist stets der Einsatz der Technologien aller drei Anwendungsbereiche mit Augenmerk auf den Einsatz im Gebäudebestand zu eruieren.

7.2 Gebäudehülle und Baustoffe

T1: Hochleistungswärmedämmungen

- Entwicklung von preisgünstigen, ökologischen, schlanken Hochleistungswärmedämmstoffen mit hohem Anwendungspotential in der Altbausanierung
- Entwicklung von Hochleistungswärmedämmstoffen mit multifunktionalen Eigenschaften (z. B. wärmedämmend/wärmespeichernd, wärmedämmend/feuchtespeichernd)

T2: Funktionelle optische Oberflächen

- Entwicklung und Einsatz spektral-selektiver Oberflächen mit geringem Emissionsgrad im Gebäudebereich zur Erhöhung der Energieeffizienz.
- Entwicklung transparenter low-e Schichten auf flexiblen Substraten wie Membranen.
- Entwicklung adaptiver low-e Schichten mit schaltbarem Emissionsgrad.

- Applikation optimierter Oberflächen mit hohem solaren Reflexionsgrad zur Reduktion von Kühllasten im Gebäude.

T3: Transparente/transluzente Elemente

- Entwicklung von hochwärmedämmenden, schlanken und leichten Fenster- und Fassadensystemen (z. B. Vakuumisolierglas mit optimierten Rahmen) mit ansprechendem Design
- Entwicklung schaltbarer Elemente mit variablen Eigenschaften z. B. g-Wert
- Entwicklung von Hybridsystemen (Kombination von Tages- und Kunstlicht)
- Entwicklung multifunktionaler Beleuchtungssysteme (z. B. Beleuchtung, Heizung/Kühlung, Lüftung)

T4: Ressourcenschonendes Bauen

- Entwicklung von Membrankonstruktionen mit optimierten thermischen und optischen Eigenschaften zur Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden.
- Applikation multifunktionaler Membrankonstruktionen für den Einsatz als Sonnenschutz-, Wärmeschutz- und Blendschutzelement sowie zur gezielten Steuerung des solaren Energieeintrags.
- Entwicklung von energieeffizienten Gebäudekomponenten mit einem hohem Grad an Trennbarkeit und Recyclingfähigkeit.
- Wirtschaftlich und ökologisch nachhaltige Begrünungskonzepte für Gebäudehüllen zur Reduzierung des Heiz- und Kühlbedarfs von Gebäuden und zur Erhöhung der Luftqualität in urbanen Bereichen

T5: Multifunktionale Gebäudehülle

- Neue Ansätze hinsichtlich Ästhetik / Optik
- (Spektrale) Funktionsschichten für PV Isolierverglasung (thermisch, optisch)
- Innovative Konzepte PV und Gebäudetechnik (zusammen mit adaptiver PV)
- Neue Messmethoden für BIPV Module (Normung)
- Entwicklung neuer Produktionskonzepte zur Standardisierung von BIPV und somit Kostensenkung
- Gesamtheitliche Gebäudesimulationen neuartiger Komponenten mit energetischer Betrachtung in Neubau und Sanierung
- Demonstration und Monitoring von Gebäudehüllen mit multifunktionalen Gebäudekomponenten durch aktive Komponenten
- Entwicklung kostengünstiger Schaltbarer Wärmedämmsysteme mit langer Nutzungsdauer

7.3 Gebäudesystemtechnik

T6 Gebäudeautomation

- Netzdienlichkeit von Gebäuden, da die Gebäudeautomation die Schlüsseltechnologie für die Sektorkopplung im Gebäudebereich darstellt. Damit ist die Entwicklung im Bereich Energiespeicherung verknüpft (Power-to-X, E-Mobility als Stromspeicher).
- Entwicklung von Gebäudeautomationstechnologien zur Netzdienlichkeit von Quartieren (SmartGrid).

- Präemptive Automation (unter Berücksichtigung von Wetter-/Nutzungs- und Lastprognosen), selbstlernende Systeme sowie themenübergreifende Systemintegration
- Vereinheitlichung von Schnittstellen zum Datenaustausch. Damit wird auch die Herstellerunabhängigkeit gefördert. Durch das Etablieren von herstellerunabhängigen Lösungen kann das Marktwachstum beschleunigt werden.
- Vereinheitlichung von Übertragungsprotokollen (drahtgebunden und drahtlos)
- Analyse des Eigenenergieverbrauchs durch die Gebäudeautomationskomponenten

T7 Wärmespeicher

- Weiterentwicklung von Hochleistungsdämmungen zur Raumoptimierung
- Optimierung von Speichermaterialien zur Erhöhung des Speichervermögens
- Integration der Gebäudestruktur in Wärmespeicherkonzepte (insbesondere im Gebäudebestand)
- Entwicklung geeigneter Steuer- und Regelalgorithmen (Smart Grid Fähigkeit)

T8 Stromspeicher

- Entwicklung zyklenstabiler Stromspeicher
- Erforschung und Entwicklung von Redox-Flow-Batterien
- Weiterentwicklung von Superkondensatoren (Supercaps) für den Einsatz in Gebäuden

T9 HLK-Systeme (Low-Ex)

- Entwicklung neuartiger und optimierter Materialien (z. B. Sorption, PCM)
- Entwicklung effizienter Komponenten (z. B. Speicher, Pumpen)
- Entwicklung niederexergetischer Systemkonzepte auf Grundlage von Umweltwärme/Solarthermie
- Optimierung von Komplettsystemen (z. B. Regelstrategien, Monitoring)

T10 Kunstlicht (LED, OLED)

- Materialforschung zur Vermeidung von Schwermetallen in OLED bei gleichbleibenden oder verbesserten Eigenschaften
- Erforschung der physiologischen Wechselwirkung des eingesetzten Lichtspektrums auf den Menschen
- Verbesserte Herstellungstechnologien, Verkapselungen (Kosteneinsparung) und Fertigung auf flexiblen Substraten

7.4 Planung und Gebäudebetrieb

T11: Informationsmanagement (BIM)

- Einbringung von Angaben zur Nachhaltigkeit (Graue Energie)
- Schnittstellenentwicklung zwischen dem BIM-Core und den momentan verfügbaren Anwendungsprogrammen

T12: Life Cycle Assessment

- Einführung eines unabhängigen dauerhaften ökologischen Bewertungssystems zur eindeutigen Vergleichbarkeit von Gebäuden (vergleichbar zur Energieeffizienz von Gebäuden)
- Einbindung von ökologischen Datensätzen für den zukünftigen Energie- und Strommix zur korrekten Bewertung der Gewichtung zwischen Konstruktion und Lebensdauer von Gebäuden (Berichtigung der unzutreffenden Untergewichtung der Gebäudekonstruktion)
- Methodenentwicklung für die fortlaufende Aktualisierung und der grundlegende Ausbau der LCA-Datenbank (Ökobaudat), Schließung von Datenlücken und Trennung von Datenkategorien
- Einfach zu bedienende und zuverlässige, in der Vorplanungsphase einsetzbare LCA-Tools, für den Einsatz bei Neubauten und in der Sanierung

T13: Monitoring und Diagnose

- Weiterentwicklung Monitoring: intelligentes und automatisiertes Auswerten der erfassten Daten (z. B. selbstlernende Systeme, Betriebsmustererkennung, Fehlererkennung) sowie das Ableiten neuer Regelstrategien daraus
- Hybridmonitoring: Simultanes Monitoring von physikalischen Gebäudemessdaten und Nutzerkomfort (bisher nur Regelung auf empirisch ermittelte Sollwerte). Hier besteht eine Verzahnung mit T14 Nutzer-Gebäude Beziehung und Schnittstellen
- Entwicklung von neuer Monitoringhardware (mit möglichst geringem Eigenenergieverbrauch und geringen Kosten)
- Entwicklung von Schnittstellen zum Austausch von Monitoring-Daten
- Vereinheitlichung von Übertragungsprotokollen (drahtgebunden und drahtlos)
- Qualitätssicherung über alle Prozesse von der Planung, über die Ausführung bis zum Betrieb des Gebäudes, unabhängig ob Neubau oder Sanierung.

T14: Nutzer-Gebäude Beziehung und Schnittstellen

- Verbessertes Verständnis des Zusammenhangs zwischen Sollwerten der Gebäudeautomation und dem Nutzerkomfort (Nutzeransprüchen bzw. -erwartungen) aufgrund der Zusammenführung von Gebäude- und Nutzermonitoring
- Optimierung der Gebäudeautomation/Raumautomation unter Berücksichtigung der Nutzerzufriedenheit, um dauerhaft eine hohe Energieeffizienz zu erreichen.
- Aufklärung von Nutzern über energetisch sinnvolles Verhalten
- Feedback sowohl für den Betreiber bei anlagentechnischen Veränderungen als auch für den Nutzer über den Einfluss seines Verhaltens auf den Energiebedarf

7.5 Quartiere

Bereits im Forschungsnetzwerk Energie in Gebäuden und Quartieren wurden F&E-Empfehlungen erarbeitet (PTJ 2015). Ein wesentliches Ziel der F&E-Anstrengungen in diesem Zusammenhang ist die Erarbeitung und Umsetzung von Energiekonzepten für Quartiere mit einem hohen Anteil an erneuerbaren Energien und ihre Einbindung in ein übergeordnetes Stromsystem unter Nutzung von Strom, Wärme und Mobilität. Die in einem Quartierskonzept zusätzlich zu Gebäuden zu betrachtenden Komponenten eines Energiesystems (Wärme- und Stromnetze, Speicher, Elektro-

mobilität) und Wechselwirkungen werden in anderen Kapiteln im Detail behandelt und entsprechende Förderempfehlungen an dortiger Stelle angegeben. An dieser Stelle werden Empfehlungen für technologieübergreifende F&E-Aktivitäten gegeben, wie sie auch von der Expertengruppe angeführt wurden (PTJ 2015):

- Methodenentwicklung zur zeitlich hochaufgelösten Modellierung, Bewertung und Optimierung in Bezug auf Energie, Ökologie und Wirtschaftlichkeit von urbanen Energiesystemen.
- Methodenentwicklung zur Erarbeitung von Transformationspfaden, die technische, stadtplanerische, soziale, ökonomische und rechtliche Aspekte berücksichtigt.

7.6 Zusammenfassung

Wie bereits im Vorgängerbericht (Wietschel et al. 2010) richtig dargestellt, ist eine strikte Priorisierung für die Notwendigkeit einer öffentlichen Förderung von F&E Aufwendungen im Technologiefeld Energieeffiziente Gebäude und Gebäudetechnik nicht sinnvoll. Die betrachteten Anwendungsbereiche Gebäudehülle und Bautechnik, Gebäudesystemtechnik und Planung und Gebäudebetrieb bilden eine synergetische Einheit und jedes dieser Felder beinhaltet ein hohes Innovations- und Effizienzpotential. Die Herausforderung ist, diese Potenziale unter wirtschaftlichen, ökologischen und gesellschaftlichen Gesichtspunkten bis zum Jahr 2050 zu erschließen. Gelingt dies, würde man 2050 rund 60 % des Endenergiebedarfs bezogen auf den Durchschnitt der Jahre von 2011-2015, entsprechend etwa 1.700 PJ/a, einsparen. Für die Umsetzung würde eine durchschnittliche energetische Sanierungsrate von 2,5 %/a benötigt werden. Die jährliche inländische Wertschöpfung beträgt in diesem Zusammenhang rund 34 Mrd. Euro und kumuliert bis 2050 rund 1.120 Mrd. Euro.

Eine qualitative Einordnung der betrachteten Technologien in das Spannungsfeld Förderbedarf und Marktpotenzial ist abschließend in Abb. 7-1 und Abb. 7-2 dargestellt.

Bei der Betrachtung des Marktpotenzials müssen aufgrund multipler Zielstellungen verschiedene Ansätze betrachtet werden. Zum einen der monetäre Aspekt, der die Wertschöpfung und zu erwartende Umsätze betrachtet (Abb. 7-1). Dabei nehmen die Technologien T11 Informationsmanagement, T12 Monitoring und Diagnose und T14 Nutzer-Gebäude Beziehung und Schnittstellen eine Sonderrolle ein, da sie auf der einen Seite ein geringes monetäres Marktvolumen aufweisen, auf der anderen Seite führen ebendiese Technologien zu bemerkenswerten Einsparungen der CO₂-Emissionen - ein notwendiger Bestandteil auf dem Weg zu einem klimaneutralen Gebäudebestand (Abb. 7-2).

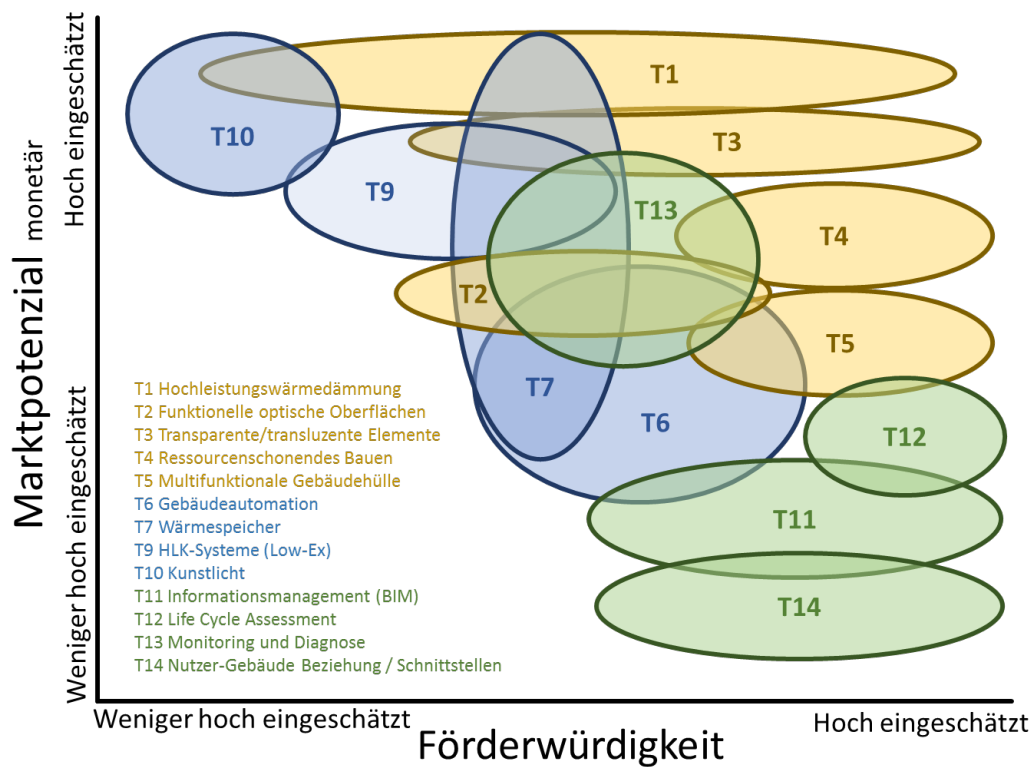


Abb. 7-1 Einschätzung des Förderbedarfs und des monetären Marktpotenzials

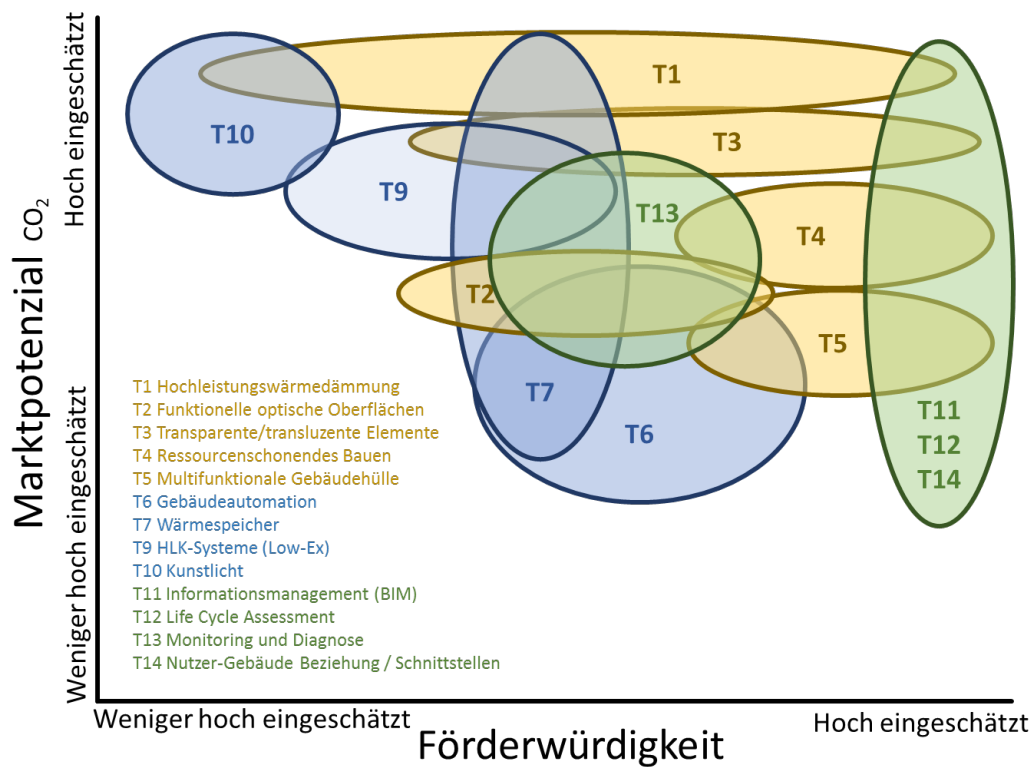


Abb. 7-2 Einschätzung des Förderbedarfs und des Marktpotenzials hinsichtlich CO₂-Einsparung

Literaturverzeichnis

- Ackermann, T. (2016): Ressourceneffiziente Erzeugung ultra-transparenter Elektroden durch perkolierende Nanostrukturen. Universität Stuttgart.
- adelphi und Borderstep (2013): Treiber und Hemmnisse für die Transformation der deutschen Wirtschaft zu einer „Green Economy“. B. f. B. u. F. (BMBF).
- Alisch, M. (2002): Soziale Stadtentwicklung. Wiesbaden, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.
- Arnold, D. (2005): Entwicklung einer Methodik für Innovationsprozesse im Wohnungsbau. Kassel, Kassel.
- Bachor A., et al. (2013): Mikro-Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen - Status und Perspektiven. VDI-Statusreport des Fachausschusses „Mikro-Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen“ (Mikro-KWK) der VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt (GEU).
- BDI, B. d. D. I. e. V. (2016). Prioritäten für die Energieforschung in Deutschland - Empfehlungen für eine wettbewerbsorientierte Technologie- und Standortpolitik in Zeiten der Energiewende. BDIPublikations-Nr. 044. Berlin, Industrieförderung GmbH.
- Bettgenhäuser, K. et al. (2011): Klimaschutz durch Reduzierung des Energiebedarfs für Gebäudekühlung, UBA.
- Binz, A. (2000): Ökologische Nachhaltigkeit im Wohnungsbau.
- BMAS (2013): Arbeitsmarktprognose 2030, Bundesministerium für Arbeit und Soziales.
- BM Online (2004): Fenstermarkt weltweit: Asien hat das größte Potenzial. <http://www.bm-online.de/allgemein/asien-hat-das-groesste-potenzial/>
- BMUB (2015): Bericht der Baukostensenkungskommission. N. Bundesministerium für Umwelt, Bau und Reaktorsicherheit.
- BMVBS (Hrsg.) (2013): Indiaktoren zur Innovationstätigkeit am Bau im internationalen Vergleich. BMVBS-Online-Publikation 08/2013. B. u. S. B. Bundesministerium für Verkehr. Berlin.
- BMWi (2015): Energieeffizienzstrategie Gebäude, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.
- BMWi: Forschung Energiespeicher. <http://forschung-energiespeicher.info/projektschau/gebaeude>
- BMWi (2017): Gesamtausgabe der Energiedaten - Datensammlung des BMWi.
- BMWi (2010): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung.
- BMWi: Forschung für energieoptimierte Gebäude und Quartiere. http://www.enob.info/fileadmin/media/Forschungsfelder/Begleitforschung_EnOB/Materialien_fuer_Projektteams/141021_EnOB_Leitfaden_Monitoring_x.pdf

- Brandhorst, J. (2014): Grundlagen der Bauphysik begrünter und unbegrünter Wände. Bau- und vegetationstechnische Grundlagen. 7. FBB-Symposium Fassadenbegrünung, Berlin, Fachvereinigung Bauwerksbegrünung e.V. (FBB).
- Breuer B.; Schmell R. (2012): Neue Stadtquartiere. BBSR-Analysen Kompakt.
- Bundesarchitektenkammer (2009): Leitbild Bau - Zur Zukunft des Planens und Bauens in Deutschland eine gemeinsame Initiative der deutschen Bauwirtschaft. .
- Bundestag, D. (2016): Drucksache 18/9322. D. Bundestag. Berlin.
- dena (2012): dena - Gebäudereport 2012.
- Diefenbach, N. et al. (2010): Datenbasis Gebäudebestand. Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand, Forschungsbericht des Instituts Wohnen und Umwelt und der Bremer Energie Instituts, Darmstadt. www.iwu.de, IWU 26 (2016).
- DIW (2014): Steigerung der Energieeffizienz. DIW Wochenbericht, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e. V. .
- DLR (2012): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global.
- ELC; CELMA (2011): The European Lighting Industry's Considerations Regarding the need for an EU Green Paper on Solid State Lighting.
- EU (2008): Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien.
- EU (2010): Richtlinie 2010/31/EU des europäischen Parlaments und des Rates vom 19. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden. Amtsblatt der Europäischen Union.
- FG Bauwerkintegrierte Photovoltaik (2012): Bauwerkintegrierte Photovoltaik-Systeme - Positionspapier.
- futureTEX (2016): Ein Zukunftsmodell für Traditionsbranchen in der vierten industriellen Revolution.
- GDW (2014): Wohnungswirtschaftliche Daten und Trends 2014/2015, GdW Bundesverband deutscher Wohnungs- und Immobilienunternehmen e. V.
- Grand View Research (2016): Insulation Market Report Insulation Market Analysis by Product (Fiberglass, Foamed Plastic, Mineral Wool), by Application (Residential Construction, Industrial, HVAC and OEM, Nonresidential Construction) and Segment Forecast to 2024
- Group, E. A.-h. i. A. (2010): Energy-Efficient Buildings PPP - Multi-Annual Roadmap and Longer Term Strategy. E. Union, Publications Office of the European Union, 2010.
- Hacke, U.; Lohmann, G. (2007): Akzeptanz energetischer Maßnahmen im Rahmen der nachhaltigen Modernisierung des Wohnungsbestandes. Abschlussbericht

- Bau- und Wohnforschung, Institut Wohnen und Umwelt GmbH -IWU-, Darmstadt. F 2497.
- Haug, S.; Vernim, M. (2014): Soziale Aspekte der energetischen Gebäudesanierung – „Sozialstudie“, Abschlussbericht zum Projekt „Erweiterungsprogramm Nachhaltige Modernisierung Historischer Stadtquartiere (NaMoHis 2)“ Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Institut für Sozialforschung und Technikfolgenabschätzung.
- Henning, H.-M. (2014): Vortrag bei der FVEE-Tagung "Forschung für die Energiewende – Phasenübergänge aktiv gestalten".
- Hoelscher, M. T. et al. (2016): Quantifying cooling effects of facade greening: Shading, transpiration and insulation. *Energy and Buildings* 114 (2016) 283-290.
- HTSM, T. S. (2013): Lighting Roadmap 2013. Lighting the Future.
- Huhn, P (2017). SMART HOME Market report 2017, Statista.
- IEA (2011): Technology Roadmap: Energy-efficient Buildings: Heating and Cooling Equipment. OECD/IEA.
- IEA (2012): World Energy Outlook 2012. 328.
- IEA (2014): Energy Technology Perspectives 2014 - Harnessing Electricity's Potential.
- IEA (2016): Energy Technology Perspectives 2016 - Towards Sustainable Urban Energy Systems.
- IÖW (2014): Kommunale Wertschöpfungseffekte durch energetische Gebäudesanierung (KoWeG). Weiß J., Prahl A., Neumann A. and Schröder A., Institut für ökologische Wirtschaftsforschung.
- ISE, F. (2013): Energiesysteme Deutschland 2050. Sektor-und Energieträgerübergreifende, modellbasierte, ganzheitliche Untersuchung zur langfristigen Reduktion energiebedingter CO₂-Emissionen durch Energieeffizienz und den Einsatz Erneuerbarer Energien.
- IW Consult (2008): Wertschöpfungskette Bau. Insitut der deutschen Wirtschaft Köln Consult GmbH.
- IWU (2012): Typology Approach for Building Stock Energy Assessment. Main Results of the TABULA project - Final Report.
- IWU (2015): Szenarienanalysen und Monitoringkonzepte im Hinblick auf die langfristigen Klimaschutzziele im deutschen Wohngebäudebestand. Bericht im Rahmen des europäischen Projekts EPISCOPE.
- Kaltschmitt, M. et al. (2006): Erneuerbare Energien. Springer.
- Kienzlein, V. et al. (2014): Über den Sinn von Wärmedämmung. KEA Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg GmbH.
- Klebsch, W. (2017): Zertifizierungsprogramm Smart Home + Building.
<http://www.zertifizierungsprogramm->

smarthome.de/smarthome/programm/Seiten/default.aspx. Letzter Zugriff: 15.02.2017

- Kleiner, W. et al. (2016): Erarbeitung eines innovativen Energie-, Ökologie- und Informationskonzepts für die Umweltstation der Stadt Würzburg. Abschlussbericht des von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt unter dem AZ: 33520/01-35 geförderten Projekts. Würzburg.
- Knecht, P. (2006): Technische Textilien, Edition Textiltechnik. 1. Auflage, Frankfurt am Main.
- Knippers, J. (2010): Atlas Kunststoffe+ Membranen: Werkstoffe und Halbzeuge, Formfindung und Konstruktion, Inst. f. Internat. Arch.-Dok.
- Krauß, O.; Werner, T. (2016): Kurzanalyse Nr. 8: Potenziale eines hochwertigen Recyclings im Baubereich. VDI Technologiezentrum GmbH.
- Krus, M. et al. (2013): Neuer tragfähiger und dämmender Baustoff aus Rohrkolben. greenbuilding 7-8 (2013) 44-47.
- Lang, W. et al. (2012): New envelopes for old buildings—the potential of using membrane systems for the thermal retrofitting of existing buildings. Life-Cycle and Sustainability of Civil Infrastructure Systems: Proceedings of the Third International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE'12), Vienna, Austria, October 3-6, 2012, CRC Press.
- LfU (2009): Natürlich bauen - Baumaterialien aus nachwachsenden Rohstoffen. B. L. f. Umwelt.
- MeGA, Fachverband Gebäudeautomationsplaner (2013): MARKTSTUDIE GE- BÄUDE- AUTOMATION SCHWEIZ 2012. <http://www.mega-pla-ner.ch/fadaladdondlz/files/.addonpublikationeintragfile/publikationen/63.pdf> /Marktstudie %20Geb %C3 %A4udeautomation %20Schweiz %202012.pdf
- NanoMarkets LC (2009): Building Integrated Photovoltaic Markets 2009 and Beyond.
- Neitzel, M. et al. (2015): Bündnis für bezahlbares Wohnen und Bauen: Bericht der Baukostensenkungskommission, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.
- OECD/IEA (2016): Energy Efficiency Market Report.
- Öko-Inst.; F. ISI (2016): Sektorale Emissionspfade in Deutschland bis 2050 – Gebäudesektor und Stromverbrauch Privathaushalte.
- Öko-Institut (2015): Klimaschutzszenario 2050 - 2. Endbericht. Modellierungsrunde. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Hg. v. Öko-Institut e. V. Berlin.
- Pfoser; N. et al. (2013): Gebäude, Begrünung und Energie: Potenziale und Wechselwirkungen. Abschlussbericht TU Darmstadt Fachbereich Architektur, Forschungsinitiative Zukunft Bau des BBSR.
- Photonics21 (2010): 2nd Strategic Research Agenda.

- Pressebox (2013): VDMA: Markt für Gebäudeautomation gewinnt an Fahrt
<https://www.pressebox.de/inaktiv/vdma-verband-deutscher-maschinen-und-anlagenbau-ev/VDMA-Markt-fuer-Gebaeudeautomation-gewinnt-an-Fahrt/boxid/821696>
- PTJ (2015): Expertenempfehlungen aus den Arbeitsgruppen: Forschungsnetzwerk Energie in Gebäuden und Quartieren, Projektträger Jülich.
- Quurck, L (2014): Elektrische Energiespeicher in Wohngebäuden. Nutzen, Auslegung, Technologie und Förderung, Technische Universität Darmstadt.
- Rein, S.; C. Schmidt (2016): Bestandsleistungen im Wohnungs- und Nichtwohnungsbau im Jahr 2014. BBSR-Analysen Kompakt 1.
- Riviere, P. et al. (2008): Preparatory study on the environmental performance of residential room conditioning appliances (airco and ventilation)-economic and market analysis. European Commission.
- Roland Berger GmbH; UniCredit Bank AG (2016): Bauwirtschaft im Wandel – Trends und Potenziale bis 2020.
- Sawyer, K. (2014): Windows and Building Envelope Research and Development: Roadmap for Emerging Technologies. U.S. Department of Energy, Building Technologies Office.
- SCCR (2015): Future Energy Efficient Building & District - Research and Innovation Roadmap.
- Schubert, S et al. (2014): Mini-/Mikro-KWK im Kontext der deutschen Energiewende. Lokale Innovationsimpulse zur Transformation des Energiesystems, TU Darmstadt, IER, Universität Stuttgart, Universität Münster.
- Skön JP (2015): Intelligent Information Processing in Building Monitoring Systems and Applications. University of Oulu.
- Sorrell, S. et al. (2009): Empirical estimates of the direct rebound effect: A review. Energy policy 37 (4) 1356-1371.
- Statista, I. (2016): Auftragseingang der deutschen Bauindustrie aus dem Ausland in den Jahren 1995 bis 2015.
- Statistisches Bundesamt (2013): Zensus 2011 - Erste Ergebnisse des Zensus 2011 für Wohnungen und Gebäude. Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt (2015): Gebäude und Wohnungen - Bestand an Wohnungen und Wohngebäuden, Bauabgang von Wohnungen und Wohngebäuden, Lange Reihe ab 1969 - 2013. Wiesbaden.
- Stevenson, F. ; Leaman, A. (2010): Evaluating housing performance in relation to human behaviour: New challenges. BUILDING RESEARCH & INFORMATION 38 (5) 437-441.
- Stinson, J. et al. (2015): Visualising energy use for smart homes and informed users. Energy Procedia 78 (2015) 579-584.

- Susorva I. (2015): Green facades and living walls: vertical vegetation as a construction material to reduce building cooling load. *Eco-Efficient Materials for Mitigating Building Cooling Needs*, Elsevier Ltd. 127-153.
- Thamling, N. et al. (2015): Hintergrundpapier zur Energieeffizienzstrategie Gebäude. Prognos, ifeu, IWU.
- UBA (2011): Umweltwirkung von Heizungssystemen in Deutschland.
- UBA (2012): Anpassung an den Klimawandel – Hitze in der Stadt eine kommunale Gemeinschaftsaufgabe. THEMENBLATT: Anpassung an Klimaänderung in Deutschland, Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung (KomPass) im Umweltbundesamt. Dessau.
- UBA (2014): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger - Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2013.
- UNEP (2016). Towards zero-emission efficient and resilient buildings, . GLOBAL STATUS REPORT
- U.S. Department of Energy (2010): cool roof fact sheet.
- vbw (2012): Energetische Gebäudesanierung in Bayern. V. d. B. W. e. V. München.
- VFF and BF (2014): Mehr Energie sparen mit neuen Fenstern, Verband Fenster + Fassade, Bundesverband Flachglas.
- Vollrath O. (2014): Energieeffizienz in Deutschland. Switzerland + Global Enterprise, Switzerland Global Enterprise.
- Voss, K.; Künz, C. (2012): Klimadaten und Klimawandel – Untersuchungen zum Einfluss auf den Energiebedarf, den Leistungsbedarf und den thermischen Komfort von Gebäuden. *Bauphysik* 34 (5) 8.
- Weiß, J.; Dunkelberg, E. (2010): Erschließbare Energieeinsparpotentiale im Ein- und Zweifamilienhausbestand. Berlin, Institut für ökologische Wirtschaftsforschung.
- Wietschel, Martin; Arens, Marlene; Dötsch, Christian; Herkel, Sebastian; Krewitt, Wolfram; Markewitz, Peter; Möst, Dominik; Scheufen, Martin (2010): *Energietechnologien 2050 - Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung*. ISI-Schriftenreihe Innovationspotentiale. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
<https://www.energietechnologien2050.de>
- Wortmann, K. (2010): Spezifische Umwelten und umweltbezogenes Handeln. *Enzyklopädie der Psychologie*. Linneweber V., Lantermann E.-D. and Kals E., Hogrefe Verlag GmbH & Co. KG.
- Wünsch, M. et al. (2014): Potenzial- und Kosten-Nutzen-Analyse zu den Einsatzmöglichkeiten von Kraft-Wärme-Kopplung (Umsetzung der EU-Energieeffizienzrichtlinie) sowie Evaluierung des KWKG im Jahr 2014.
- Wünsch; M. et al. (2013): Maßnahmen zur nachhaltigen Integration von Systemen zur gekoppelten Strom- und Wärmebereitstellung in das neue Energieversorgungssystem, Prognos, BDEW, AGFW.

- Xiao, F.; Fan, C. (2014): Data mining in building automation system for improving building operational performance. *Energy and Buildings* 75 (2014) 109-118.
- Yu S., E. M. (2010): China's R&D for Energy Efficient Buildings: Insights for U.S. cooperation with China. P. N. N. Laboratory, U.S. Department of Energy.
- Yu S., E. M. (2010): India's R&D for Energy Efficient Buildings: Insights for U.S. cooperation with India. P. N. N. Laboratory, U.S. Department of Energy.
- Zirnzak W. (2011): Aktuelle Situation der deutschen Textilindustrie in Zahlen – Entwicklung in der Krisenzeit – Krisenbewältigung mit technischen Textilien. Business-Forum Technical Textiles 23.-24.03.2011, Frankfurt/M.